



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Escola d'Enginyeria de Terrassa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

Proyecto Fin de Grado.

Diseño de un controlador para una mini-turbina eólica

Autor

Roger Borque González

Tutor

Álvaro Luna Alloza

Presidente

Juan Ramón Hermoso Costa

Terrassa, Octubre 2015

*Als meus pares, per la seva incansable convicció
i a la iaia Isabel (besàvia), una font d'inspiració pels que tenim la sort d'envoltar-la.*

RESUMEN

El aumento de la demanda energética en una sociedad que basa su modelo de crecimiento en el consumo, es una realidad a la que se debe atender. Históricamente esta demanda se ha suplido a base de grandes centrales hidroeléctricas, térmicas - de combustible fósil - y más recientemente nucleares, con el único fin de abastecer dicha demanda, sin tener presente el impacto ecológico que ello conlleva. Hacia la última década del siglo pasado se empieza a tomar consciencia, creándose las primeras centrales de generación renovable (básicamente solar fotovoltaica y eólica). Desde entonces, se ha dedicado mucho tiempo y esfuerzo a la optimización de ese modelo de generación, invirtiendo en nuevas tecnologías e investigación, con el fin de satisfacer la creciente demanda energética a base de tecnologías respetuosas con el medio, así como suplir antiguas centrales - no renovables - .

Todos los diferentes métodos de generación energética renovable tienen ciertas semejanzas y comparten componentes. En este proyecto se realiza un estudio de uno de estos elementos: El inversor. Concretamente se estudia un inversor de potencia trifásico de 10kW que comunica el lado de CC (Corriente Continua) con la red CA (Corriente Alterna). En el estudio se tratará el diseño del control de corriente en lazo cerrado, utilizando un sistema de referencia síncrono ($abc-\alpha\beta$), y trabajando en el dominio de variables continuo (dominio s), controlado por un sistema PR (Proporcional Resonante).

A lo largo del proyecto se realiza una explicación de los elementos que componen el inversor (hardware) y se realiza el diseño y validación del control digital (software) mediante el simulador PSim, y la herramienta de cálculo Matlab, con el objetivo de sintonizar el controlador.

Finalmente se realizan una serie de experimentos con el inversor, con el objetivo de contrastar los valores obtenidos a partir de cálculos y simulaciones con los valores obtenidos en los ensayos.

ABSTRACT

The increase in energy demand in a society which growth model is based in consumption is a reality that must be attended. Traditionally it has been made up for based on big hydroelectric power plants, thermal plants -by means of fossil combustible- and recently nuclear plants, with the single objective of provide that demand, without thinking about the ecological impact. By the last decade of the past century, the companies start to take care about it, creating the first renewable generation plants (basically two technologies: solar photovoltaic and wind turbines). Since then, the companies has been inverting much time and effort to optimize the generation model, investing in new technologies and research, in order to satisfy the increasing energetic demand by means of renewable technologies, and also replacing the old plants (which aren't renewable).

All the different methods of renewable energy generation have some shared components and similarities. In this project, a study of one of these elements is performed: The inverter. Specifically it is a three-phase and 10kW power inverter which connects the DC side (Direct Current) to AC (Alternating Current). The base of this study will be the design of the closed loop current control, using a synchronous reference system ($abc-\alpha\beta$), working in the continuous domain (s domain) and using a PR controller (Proportional Resonant)

During the project an explanation of the elements of the inverter (hardware) is performed, and also the design validation of the digital control (software) by means of the PSim simulator and Matlab, in order to tune the controller.

Finally, there are performed some experiments with the inverter, in order to test the values obtained from the simulations and calculations with the values obtained in the tests.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecer a todo el personal que forma parte del equipo del SEER por sus aportaciones y su accesibilidad, así como al personal de prácticas y doctorandos, pues siempre he tenido alguien con quien contrastar conocimientos y resolver determinadas dudas. A Álvaro Luna, mi tutor, por las horas dedicadas.

Gracias también a mis padres por su incansable empuje, por creer en mí en todo momento y por ofrecerme su visión desde una perspectiva distinta, tanto durante el transcurso del proyecto como durante toda la carrera, y en la vida en general.

Finalmente, gracias a todos los que, de un modo u otro, habéis hecho que esta etapa no sólo conste de libros, bibliotecas, prácticas y exámenes. Especial mención a lo que ha sido mi familia de acogida en Terrassa: Colla Castellera Bergants del Campus de Terrassa, gràcies per fer pinya en tot moment.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	13
1.1. Motivación.....	13
1.2. Objetivos.....	14
1.3. Antecedentes y alcance.....	17
1.4. Tareas y planificación temporal.....	19
1.5. Estructura del documento.....	21
 2. Estado del Arte.....	 23
2.1. Estructura y control de los inversores eólicos.....	25
2.1.1. Estructura de los inversores eólicos.....	26
2.1.2. Tipologías de inversores	27
2.1.2.1. Según el parámetro de entrada	27
2.1.2.2. Según el mecanismo de conmutación.....	28
2.1.3. Convertidores para minieólica.....	34
2.2. Control del sistema.....	35
2.2.1. Modulación del ancho de pulsos (PWM).....	35
2.2.2. Etapa de control.....	38
2.2.2.1. Necesidad de realimentación en la etapa de control... ..	39
2.2.2.2. Tipos de controladores.....	40
2.2.2.3. Estructura del control seleccionado.....	43
 3. Elementos del Sistema.....	 47
3.1. Condensador lado DC: Bus de continua.....	48
3.2. Resistencia de frenado (Braking Resistance).....	49
3.3. Pletinas de cobre.....	50
3.4. Comunicación con el PC.....	51
3.4.1. Proyecto en lenguaje programado.....	52
3.4.2. Tarjeta de control.....	52
3.4.3. JTag.....	53
3.4.4. Digital Signal Processor (DSP).....	54
3.4.5. La conmutación (IGBTs).....	55
3.5. Filtrado de la señal (filtro LC).....	55
3.6. Transformador elevador (133-400 Vrms).....	58
3.7. Protecciones.....	59
3.7.1. Lado DC.....	59
3.7.2. Lado AC.....	60
3.8. Aparamenta de maniobra.....	61

4. Control del convertidor: Software.	63
4.1. Diagrama de bloques esquema de control.....	63
4.2. Transformada de Clarke abc- $\alpha\beta$	65
4.2.1. Concepto.....	65
4.2.2. Pros/Contras respecto al sistema de ejes síncronos.	67
4.3. Controlador Proporcional Resonante: PR.....	68
4.3.1. Pros/Contras respecto al Proporcional Integral (PI).....	68
4.4. Control del sistema en lazo cerrado: Justificación de los parámetros.....	70
4.4.1. Simulaciones y resultados obtenidos.....	75
4.5. Proyecto en código C#.....	79
4.5.1. Máquina de Estados: Concepto.....	79
4.5.2. Otras variaciones realizadas:	83
5. Caso Práctico: Ensayos Experimentales.	86
5.1. Ensayo preliminar. Comprobación secuencia de fases.....	88
5.2. Test del lazo de corriente.....	93
5.3. Control de inyección de potencia activa.....	99
5.4. Control de inyección de potencia reactiva.....	102
5.5. Test del algoritmo del MPPT (Maximum Power Point Tracking).....	105
5.6. Test de la Máquina de Estados.....	112
5.7. Tasa de Distorsión Armónica en la corriente inyectada. %THDi.....	119
6. Conclusiones y trabajo futuro.....	123
6.1. Conclusiones.....	123
6.2. Trabajo futuro.....	124
Anexo (i): Presupuestos.....	125
Anexo (ii): Normativa	128
Anexo (iii): Bibliografía.....	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.- Cuadro 'EDT' de las diferentes etapas definidas para el proyecto	16
Fig. 2.- Diagrama de Gantt	20
Fig. 3.- Estructura básica del Convertidor Electrónico de Potencia	23
Fig. 4.- Estructura general sistema de generación eólica.....	25
Fig. 5.- Partial-Scale Power Converter	26
Fig. 6.- Full-Power Converter.....	26
Fig. 7.- Esquema del IGBT.....	28
Fig. 8.- Esquema del inversor tipo Push-Pull	29
Fig. 9.- Esquema del inversor tipo Half-Bridge.....	30
Fig. 10.- Esquema del inversor Full-Bridge con salida monofásica	31
Fig. 11.- Justificación de los estados según la conmutación de los IGBTs	31
Fig. 12.- Esquema del inversor Full-Bridge con salida trifásica.....	32
Fig. 13.- Inversor trifásico puente completo	36
Fig. 14.- Comparación de la tensión portadora con la de referencia (Duty).....	36
Fig. 15.- Resultante tras la comparación entre la portadora y el Duty.....	37
Fig. 16.- Señal a la salida del inversor (valor de línea).....	37
Fig. 17.- Señal después de haber pasado por el Filtro LC.	38
Fig. 18.- Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.....	39
Fig. 19.- Circuito equivalente Controlador PR.	43
Fig. 20.- Pulse Width Modulation. Planta del inversor.....	44
Fig. 21.- Filtrado señal AC (Filtro LC).....	45
Fig. 22.- Etapa de Realimentación.....	45
Fig. 23.- Montaje final. Parte de control + Parte de potencia.	46
Fig. 24.- Conexión de la Resistencia de frenado del bus de continua	50
Fig. 25.- Conducción de la corriente continua mediante pletinas de cobre	51
Fig. 26.- Tarjeta de control con los diferentes periféricos conectados.	53
Fig. 27.- JTag con el conector que la une a la placa de control.	54
Fig. 28.- Esquema comunicación PC-Convertidor.	54
Fig. 29.- Tarjeta DSP (de Texas Instrument).	55
Fig. 30.- Esquema unifilar del Filtro LC.....	56
Fig. 31.- Filtro LC	57
Fig. 32.- Transformador elevador.	59
Fig. 33.- Detalle de la instalación de las protecciones lado DC (Fusible).	60
Fig. 34.- Sistema de Protecciones que integra el Convertidor.....	61
Fig. 35.- Botonera de Maniobra.....	62
Fig. 36.- Diagrama de bloques de las etapas de Control y Potencia.....	64
Fig. 37.- Diagrama vectorial ejes abc- $\alpha\beta$	65
Fig. 38.- Intensidades antes y después de pasar por el giro de Clarke.....	67

Fig. 39.- Diagrama de control en caso de montar un Proporcional Integral	69
Fig. 40.- Diagrama de control con el Proporcional Resonante.	69
Fig. 41.- Esquema de control con las ecuaciones que modelan cada elemento.	70
Fig. 42.- Matlab Code (i): Declaración de los diferentes parámetros.	71
Fig. 43.- Matlab Code (ii): Declaración de las ecuaciones de cada elemento.	72
Fig. 44.- Matlab Code (iii): Declaración del lazo abierto del sistema.	72
Fig. 45.- Matlab Code (iv): Ejecución de la herramienta <i>Siso Tool</i>	73
Fig. 46.- <i>Siso Tool</i>	73
Fig. 47.- Bode Plot for Closed Loop system.	74
Fig. 48.- Consigna de corriente antes y después del escalón.	75
Fig. 49.- Onda de corriente medida en comparación con la referencia	76
Fig. 50.- Señal antes de entrar en la etapa de la conmutación, <i>Duty</i>	77
Fig. 51.- Corriente a la salida del convertidor antes y después del escalón.	77
Fig. 52.- Diagrama de Estados	82
Fig. 53.- Variación de potencia en función del tiempo según arranque	85
Fig. 54.- Imagen del setup completo del sistema (i)	87
Fig. 55.- La ingeniería también es arte. Imagen del setup completo (ii)	87
Fig. 56.- Esquema unifilar del montaje.	89
Fig. 57.- Workspace del Code Composer	91
Fig. 58.- Esquema unifilar del montaje para el test del lazo de corriente.	94
Fig. 59.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT.	96
Fig. 60.- Vista general del interior del convertidor.	98
Fig. 61.- Esquema unifilar montaje para test del Control de Potencia Activa.	99
Fig. 62.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT.	100
Fig. 63.- Comportamiento dinámico ante un escalón de potencia reactiva	103
Fig. 64.- Imagen completa del Setup	106
Fig. 65.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 2,00\text{kW}$	108
Fig. 66.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 3,50\text{kW}$	108
Fig. 67.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 4,50\text{kW}$	109
Fig. 68.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 5,50\text{kW}$	109
Fig. 69.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 6,50\text{kW}$	110
Fig. 70.- Lectura de la señal a la salida del convertidor, lado AT. $P = 7,00\text{kW}$	110
Fig. 71.- Comparación entre potencia teórica y potencia obtenida.	112
Fig. 72.- Comportamiento del convertidor ante caída de tensión en el Bus DC.	115
Fig. 73.- Comportamiento del convertidor ante caída de tensión en la red	117
Fig. 74.- %THDi para fase R.	120
Fig. 75.- %THDi para fase S.	120
Fig. 76.- %THDi para fase R	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Planificación Temporal.	20
Tabla 2.- Comparación VSC - CSC.....	27
Tabla 3.- Tensión de salida (Full-Bridge monofásico)	31
Tabla 4.- Tensión de salida (Full-Bridge trifásico).....	33
Tabla 5.- Tabla de Características del Inversor.	47
Tabla 6.- Placa de características del transformador elevador.....	58
Tabla 7.- Justificación parámetros Matlab.....	71
Tabla 8.- Escalas de los elementos de medida, ensayo lazo de corriente.	96
Tabla 9.- Escalas de los elementos de medida, inyección potencia activa.	100
Tabla 10.- Escalas de los elementos de medida, inyección potencia reactiva.	104
Tabla 11.- Tabla-Resumen con las lecturas de los gráficos anteriores.	111
Tabla 12.- %THD de la corriente inyectada para cada una de las fases	121
Tabla 13.- Presupuesto Hardware. Valores sin I.V.A.....	125
Tabla 14.- Presupuesto Software. Valores sin I.V.A.	125
Tabla 15.- Vida útil material según aplicación.	126
Tabla 16.- Costes reales del material usado, I.V.A. no incluido.....	126
Tabla 17.- Presupuesto Alquiler Bancada de Laboratorio. Valor sin I.V.A.	126
Tabla 18.- Desglose de días según etapa.	127
Tabla 19.- Presupuesto Recursos Humanos.....	127
Tabla 20.- Presupuesto Total Proyecto.	127

CAPÍTULO
1.

Introducción

En este primer capítulo se realiza una descripción de los aspectos generales relativos a las fases de desarrollo, su planificación temporal y los medios que han sido necesarios para su realización. Por último, se muestra la estructura de capítulos que componen este Proyecto.

1.1. Motivación.

El origen etimológico de la palabra ingeniería se halla en el latín, ingenium, término que puede traducirse como ‘producir’. Así pues, la finalidad del ingeniero es la creación de una idea en la realidad a través de técnicas, diseños y modelos, con el objetivo de resolver problemas y satisfacer necesidades.

No obstante, tan importante es ‘producir’, como tener una cierta sensibilidad con el entorno. Hay quien verá este segundo aspecto como un valor añadido; yo, personalmente, lo entiendo como un ítem fundamental en cualquier ingeniero de cualquier ámbito.

En el caso de la ingeniería eléctrica, uno de los campos que combina los conceptos ‘ingeniería’ y ‘sostenibilidad’ es la integración de fuentes de energía renovable a la red. Esta comunicación se realiza mediante una serie de elementos entre los cuales se halla el objeto de estudio del proyecto: el convertidor de corriente continua a alterna.

1.2. Objetivos.

Los principales objetivos que se pretenden abarcar en el proyecto son:

- Estudio previo de los diferentes componentes del inversor. (Software).
- Estudio de la etapa de control y sincronización del inversor. (Hardware).
- Control y sintonización mediante programas de cálculo y simulación.
- Implementación de las simulaciones en ensayos experimentales. (Caso práctico).

A continuación se describen las diferentes etapas de desarrollo y las tareas que se van a realizar en cada una de ellas con el objetivo de tener una idea del hilo que se sigue a lo largo del Proyecto. Tal y como se muestra en los siguientes puntos, este proyecto está basado en tres bloques principales:

- **Etapas 1: Análisis preliminar.**

- **Sistemas de inversores de potencia.** Realización de un estudio de los diferentes elementos que componen el inversor, con el fin de comprender su funcionamiento y así desarrollar el proyecto.
- **Modelo matemático del control elegido.** Análisis de la estrategia de control elegida a nivel de Hardware, compuesta por dos grandes bloques: Por un lado, el modelo matemático de la matriz de giro de *Park* para pasar del sistema de ejes de referencia trifásico (ejes abc) al sistema de ejes de referencia síncronos (ejes $\alpha\beta$). Por otro lado, el controlador encargado de dar estabilidad al lazo de corriente: PR (Proporcional Resonante).
- **Softwares necesarios.** Familiarización con los programas de simulación de potencia PSim, con el que se implementan los diferentes montajes (de este programa es de especial interés la aplicación del *SIMVIEW*), y Matlab, con el que se sintonizan los controladores (de este programa es de especial interés la herramienta sisotools).

- **Etapas 2: Implementación.**

- **Análisis y diseño inicial.** Tras realizar un estudio completo de los diferentes componentes que tiene el inversor, en este punto se contempla la elección de

cada uno de los bloques de que constará la implementación final vía PSIM, aplicando los esquemas y estrategias de control anteriormente estudiadas, sobre simulaciones.

- **Implementación y evaluación del sistema.** Montaje en PSIM del sistema entero con los valores reales de los diferentes elementos que lo componen. Sintonía definitiva (y verificación que sea la correcta) del controlador del sistema (PR) - mediante *Matlab*-. Proceso de pruebas con el sistema completo hasta obtener la estabilidad del sistema, así como las respuestas deseadas.
 - **Validación del montaje.** Simulación a tiempo continuo del montaje realizado vía *PSIM*, a partir de la herramienta de simulación y seguimiento de señales que incluye el propio programa: *SIMVIEW*.
 - **Caso práctico.** Implementación experimental del montaje realizado, a partir de un inversor trifásico real de 10kW de potencia.
- **Etapas 3: Redacción y presentación.**
 - **Memoria escrita del Proyecto.** Redacción del cuerpo del documento que compone la memoria del Proyecto Final de Grado.
 - **Presentación del Proyecto.** Elaboración de la presentación final del Proyecto Final de Grado.

En la Fig. 1 se muestra la estructura en árbol EDT (“Estructura de Descomposición del Trabajo”) donde se exponen de forma jerárquica las diferentes etapas y procesos del Proyecto. De este modo se pueden observar los principales puntos del proyecto.

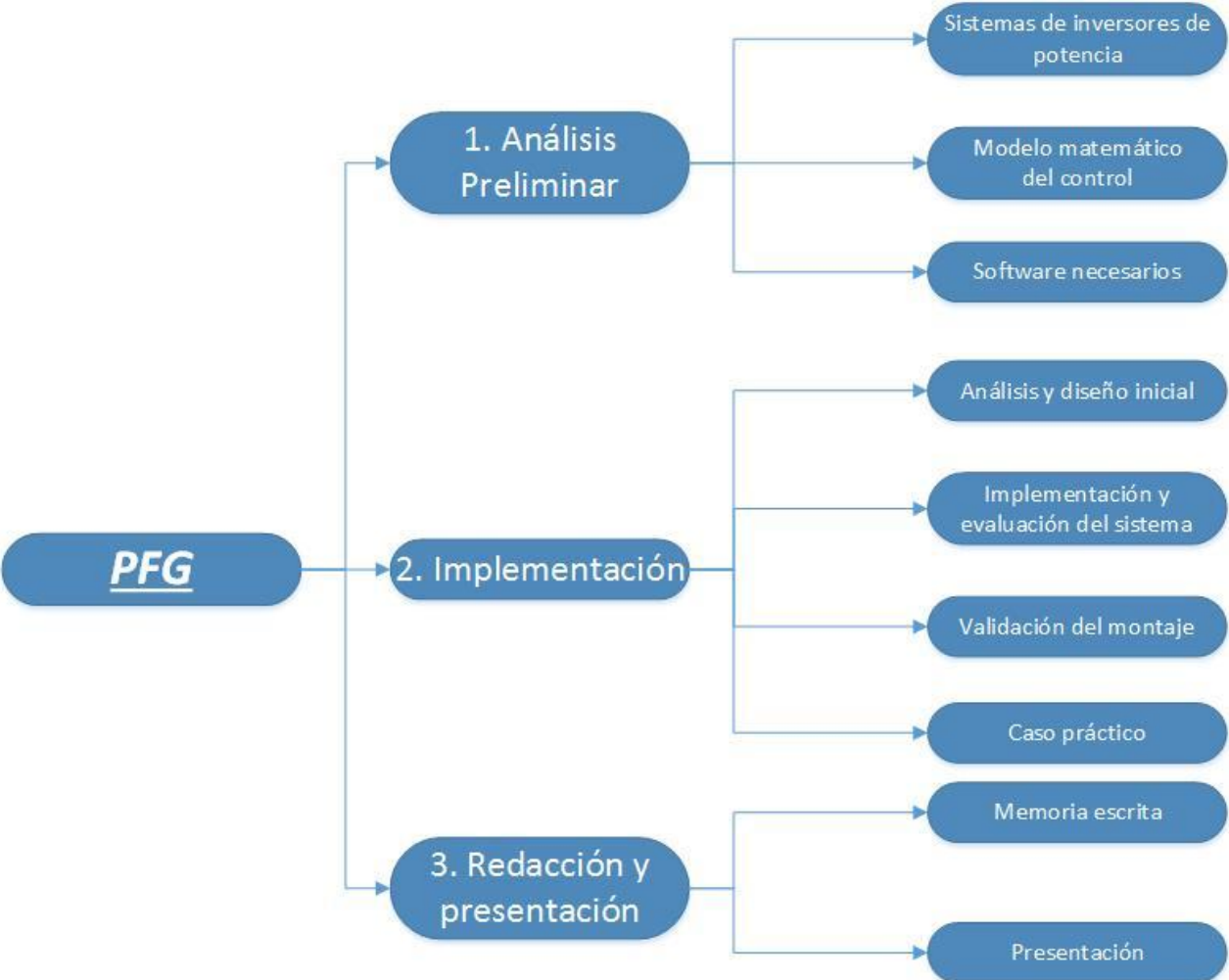


Fig. 1.- Cuadro 'EDT' de las diferentes etapas definidas para el proyecto

1.3. Antecedentes y alcance.

Este proyecto se basa en la comprensión, manipulación y mejora de un inversor diseñado para aplicaciones de mini-eólica. Es por ello que, desde un inicio se parte de una base ya existente, y se pretende aplicar una serie de mejoras. A continuación se especifica de qué se trata dicha base ya existente (antecedentes) y qué mejoras se pretenden aplicar al finalizar el proyecto (alcance):

- **Antecedentes.**

Inicialmente se parte del inversor de potencia, elemento de estudio, así como del código programado (proyecto en lenguaje C#) encargado de manipular el convertidor. Cabe decir que el convertidor fue diseñado y puesto a punto en 2012, por lo que, en un principio, se parte con garantías de conseguir exitosamente su puesta en marcha.

Por otro lado, a nivel de conocimiento personal, se parte de la base de lo que se ha adquirido en diferentes asignaturas de la carrera, íntimamente ligadas a lo que se aplicará en el proyecto. Estas asignaturas son básicamente dos: Procesado Electrónico de Potencia e Integración en la Red Eléctrica de Energías Renovables.

- **Alcance.**

Una vez arrancado el convertidor, se han detectado una serie de aspectos en los que se pueden aplicar ciertas mejoras. Estos aspectos son los siguientes:

- Afinar los valores de los controladores para obtener una respuesta más estable.
- Aplicar un algoritmo de cálculo del Punto de Máxima Potencia (MPP) para poder inyectar a la red una potencia u otra en función del parámetro de entrada que controla el inversor (que es la tensión en el bus de continua).
- Mejorar la máquina de Estados. El código programado que controla el inversor tiene una parte que se dedica a activar una salida u otra en función de diferentes parámetros de entrada.
- Una vez aplicados dichos cambios, realizar lecturas sobre el convertidor para comprobar su correcto funcionamiento.

Para llevar a cabo los puntos anteriormente citados, será necesaria la familiarización con diferentes elementos que se encuentran en torno al inversor, como ahora:

- Comprensión del código programado en lenguaje C# del proyecto ya existente.
- Familiarización con el programa que se utiliza (Code Composer Studio).

Para llevar a cabo el proyecto, y alcanzar los puntos anteriormente descritos, los medios necesarios a emplear son los siguientes:

- Recursos Hardware:
 - Ordenador.
 - Inversor trifásico de 10kW de potencia (incluye todos los elementos de potencia, control y protecciones, así como el proyecto programado en C#).
 - Aparatos de medida.
 - Multímetros.
 - Osciloscopio.
 - Sondas de tensión y corriente.
 - Rectificador (empleado a modo de fuente DC).
 - Autotransformador (empleado a modo de fuente AC).
- Recursos de Software:
 - Paquete de Microsoft Office 2007.
 - Visual Basic 2013.
 - PSIM Professional (v 9.0.3.400).
 - Matlab Versión 7.10.0.499 (R2010a).
 - Code Composer Studio (v 3.3.38.2).
- Recursos bibliográficos:
 - Se emplean numerosos libros y artículos, así como manuales de los programas empleados. Toda esta documentación se recoge de forma detallada en el apartado de la bibliografía.

1.4. Tareas y planificación temporal.

Una vez fijadas las fases y tareas en que se ha dividido el proyecto, se procede a la planificación temporal de las diferentes etapas. Para ello se utilizará el Diagrama de Gantt, dónde se vinculan las diferentes tareas a un calendario, permitiendo de esta forma realizar un seguimiento detallado del avance de cada una de las partes que componen el proyecto.

A continuación se muestra una tabla dónde se indica la fecha de inicio de cada una de las tareas así como su duración y la fecha final de las mismas (Tabla 1) y el Diagrama de Gantt correspondiente a dicha tabla (Fig. 2).

ACTIVIDAD	FECHA INICIAL	DURACIÓN (días)	FECHA FINAL
Etapa 0: Inicio del proyecto	02/03/2015	0	02/03/2015
Etapa 1: Análisis preliminar	02/03/2015	60	01/05/2015
Sistemas de inversores de potencia	02/03/2015	20	22/03/2015
Modelo matemático del control elegido	22/03/2015	20	11/04/2015
Softwares necesarios	11/04/2015	20	01/05/2015
Etapa 2: Implementación	04/05/2015	120	01/09/2015
Análisis y diseño inicial	04/05/2015	20	24/05/2015
Implementación y evaluación del sistema	24/05/2015	40	03/07/2015
Validación del montaje	03/07/2015	30	02/08/2015
Caso práctico	02/08/2015	30	01/09/2015
Etapa 3: Redacción y presentación	01/09/2015	40	11/10/2015
Memoria escrita del proyecto	01/09/2015	20	21/09/2015
Presentación del proyecto	21/09/2015	20	11/10/2015

Tabla 1.- Planificación Temporal.

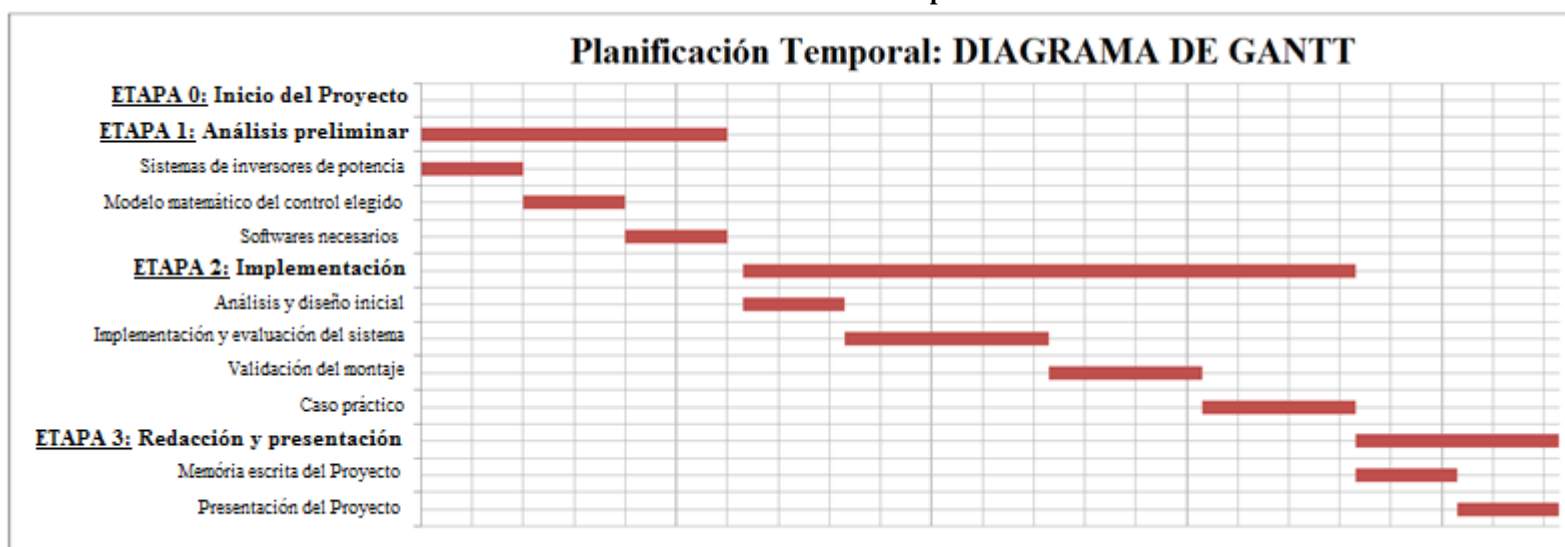


Fig. 2.- Diagrama de Gantt

1.5. Estructura del documento.

Antes de empezar con el cuerpo del Proyecto, se muestra un breve resumen del contenido de cada capítulo del mismo, con el objetivo de guiar al lector de los contenidos que contienen cada uno de ellos.

Capítulo 1. Introducción. En este primer apartado se describen los objetivos y propósitos del contenido del Proyecto, así como las diferentes estrategias de avance (fases de desarrollo), los recursos empleados y la estructura de la memoria.

Capítulo 2. Estado del Arte. En este punto se realiza un estudio completo de los diferentes conceptos de inversores ya existentes, haciendo especial hincapié en los diferentes métodos de modulación y estrategias de control. También se presentan los programas usados para realizar las simulaciones y cálculos (PSIM y Matlab, respectivamente).

Capítulo 3. Elementos del Sistema. Hardware. Explicación detallada de los diferentes elementos que componen el Hardware, tanto a nivel de potencia como de protecciones.

Capítulo 4. Control del Convertidor. Software. Explicación detallada de los diferentes elementos que componen el Software. Se detalla y argumenta el motivo por el cual se usan sistemas de control como ahora el giro abc- $\alpha\beta$, controlador PR, máquina de estados y finalmente se muestra el control de corriente del sistema, primero en lazo abierto y a continuación en lazo cerrado.

Capítulo 5. Caso Práctico. Ensayos Experimentales. Ejecución de diferentes ensayos sobre el convertidor y breve explicación de qué consiste cada uno de ellos.

Capítulo 6. Conclusiones. Exposición de las principales ideas, cuestiones y conclusiones a las que se ha llegado una vez finalizado el Proyecto.

Anexo (i). Presupuesto. Breve análisis de los costes de los materiales que componen el inversor, así como los elementos de medida utilizados.

Anexo (ii). Normativa. Mención de las principales normas que regulan los diferentes parámetros respecto a la inyección de potencia a red a partir del recurso eólico.

Bibliografía. Referencias bibliográficas de los diferentes libros, artículos, manuales y demás material consultado para llevar a cabo el Proyecto y la memoria.

CAPÍTULO 2.

Estado del Arte

El convertidor de potencia es un sistema o equipo electrónico que básicamente se encarga de transformar energía eléctrica de un formato de entrada a otro de salida. Puesto que el procesamiento de la energía es íntegramente electrónico, los rendimientos típicos de los convertidores suelen ser muy elevados, ya que no hay elementos móviles que aporten pérdidas mecánicas.



Fig. 3.- Estructura básica del Convertidor Electrónico de Potencia

Hay varios criterios para la clasificación de los convertidores. Uno de los más comunes es el que se basa en la naturaleza de la energía presente en la entrada y salida del dispositivo. Dicha energía puede ser del tipo DC o AC, creándose así cuatro distinciones:

- AC-DC. Este tipo de convertidores se conocen como Rectificadores. La corriente a la entrada es del tipo alterna, y mediante la conmutación de los IGBTs se logra una corriente continua a la salida.
- DC-DC. Este tipo de convertidores se conocen como *Chopper*, y su finalidad suele ser la de regulador de tensión. Este grupo de convertidores está dividido en tres familias, según la relación entre la energía de salida y la de entrada:
 - Convertidores *Buck* (Reductor): La tensión de salida es menor que la tensión de entrada. $V_{out} < V_{in}$.
 - Convertidores *Boost* (Elevador): La tensión de salida es mayor que la tensión de entrada. $V_{out} > V_{in}$.
 - Convertidores *Buck-Boost* (Reductor-Elevador): La tensión de salida tanto puede ser mayor como menor que la tensión de entrada.
- AC-AC. Este tipo de convertidores reciben diferentes denominaciones según su función, clasificándose en:
 - Reguladores de tensión: La frecuencia a la entrada y a la salida es la misma, pero varía el módulo de la tensión.
 - Variadores de frecuencia: Para este segundo caso la frecuencia de la salida no es la misma que la de la entrada.
- DC-AC. Este tipo de convertidores se conocen como Inversores u onduladores. A partir de una señal de entrada corriente continua, y gracias a la conmutación de los IGBTs, se obtiene una señal de corriente alterna a la salida.

De los cuatro tipos de convertidores citados anteriormente, el actual proyecto se ocupa de la última tipología: Los Inversores.

Este tipo de convertidores permiten realizar un control tanto la frecuencia como del valor eficaz de la señal que haya en su salida (tensión o intensidad). Es por este motivo que suelen instalarse en diferentes tecnologías, como el control de motores AC de velocidad variable o para fuentes de corriente alterna ininterrumpida (SAIs), donde el objetivo es producir una señal de corriente alterna sinusoidal cuya magnitud y frecuencia puedan ser controladas. Otra aplicación fundamental de los inversores (que es la que se desarrolla) es la de integración de sistemas de energía renovable a la red.

2.1. Estructura y control de los inversores eólicos.

Las etapas de conversión de potencia para un sistema típico de generación de energía mediante turbinas eólicas es el que se muestra en la Fig. 4, donde la potencia capturada a partir del viento es la entrada y la energía eléctrica que se inyecta a la red eléctrica, la salida.

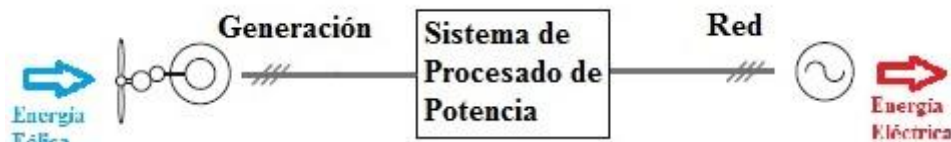


Fig. 4.- Estructura general sistema de generación eólica

A lo largo de todo el proceso, existen dos etapas claramente diferenciadas por el tipo de energía que se gestiona en cada una de ellas:

- **Etapas de conversión de energía mecánica:** En esta primera etapa, la turbina eólica capta la energía del viento, que es transformada a energía mecánica rotatoria a través de un buje. A continuación se instala una caja de cambio que aumenta la velocidad de rotación a costa de disminuir el par de rotación, lo que contribuye a la reducción en tamaño y peso del siguiente elemento, que es el generador. En este punto es donde se realiza la conversión de energía mecánica a eléctrica.
- **Etapas de conversión de energía eléctrica:** En esta segunda etapa, se genera energía eléctrica a partir de un par mecánico mediante el generador anteriormente mencionado. A continuación dicha energía (generada en alterna), pasa por un convertidor rectificador (conversión AC-DC) y seguidamente por un convertidor inversor (conversión DC-AC). Llegado a este punto, la energía es en alterna y pulsa en sincronía con la red. El último elemento del sistema es un transformador elevador, encargado de elevar la tensión a la nominal de la red.

2.1.1. Estructura de los inversores eólicos.

Existen diferentes estructuras, según la disposición de los elementos que integran el sistema de conversión y control de potencia. Estas estructuras están clasificadas según:

- **Generador asíncrono (de inducción) doblemente alimentado con convertidor a escala parcial.** Se utiliza un convertidor en conjunto con la doble alimentación del generador de inducción. Los bobinados del estator van directamente conectados a la red eléctrica, mientras que el rotor está alimentado a partir de un inversor. De este modo se consigue una cierta flexibilidad en cuanto a la frecuencia y corriente, lo que conlleva a una amplia gama de velocidades de rotación.

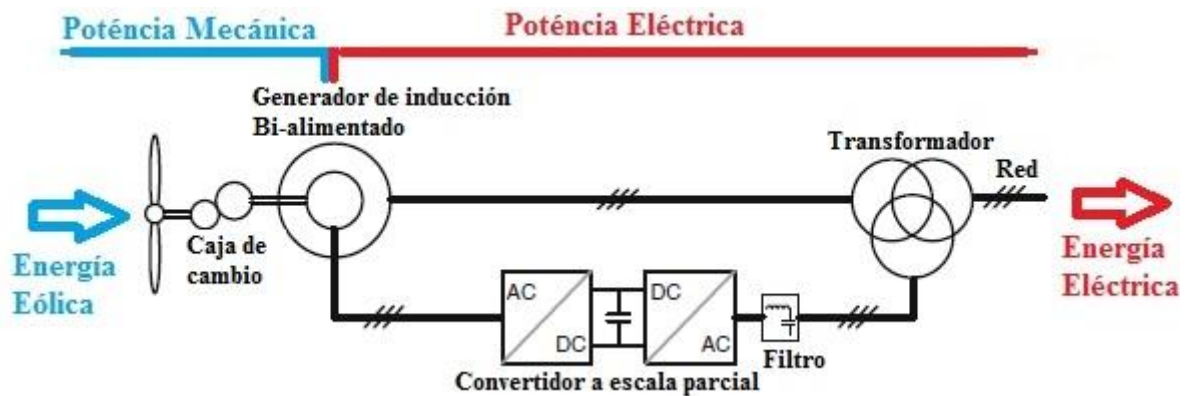


Fig. 5.- Partial-Scale Power Converter

- **Generador síncrono/asíncrono con convertidor a plena escala.** En este segundo sistema, se utiliza un convertidor a gran escala para interconectar la red eléctrica con los devanados estatóricos del generador. Si en el caso anterior se regulaba la energía inyectada a red variando el comportamiento del generador a partir de la excitación, en este segundo caso el control se realiza sobre la energía generada, a partir del inversor.

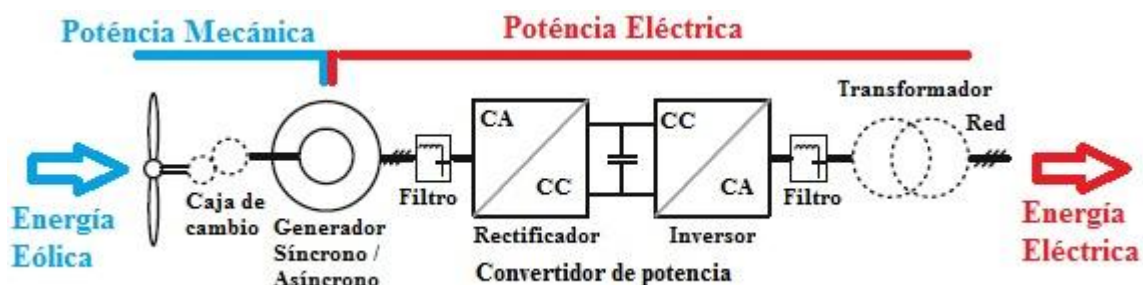


Fig. 6.- Full-Power Converter.

2.1.2. Tipologías de inversores.

Los inversores se pueden clasificar según dos posibles criterios. En función del parámetro de entrada (tensión/corriente) y por otro lado, según la estrategia de conmutación empleada.

2.1.2.1. Según el parámetro de entrada.

Dentro de este criterio de clasificación, se distingue entre:

VSC: Voltage Source Converter. El parámetro que resulta ser constante en la entrada (Lado DC) es la tensión.

CSC: Current Source Converter. El parámetro que resulta ser constante en la entrada (Lado DC) es la corriente.

A continuación se muestra una tabla donde se muestra un estudio comparativo entre el VSC y el CSC (trabajando ambos como inversores).

VSC	CSC
Se alimenta a partir de una fuente de tensión DC cuya impedancia tiene un valor muy reducido, llegando a ser insignificante.	Se alimenta a partir de la corriente ajustable de una fuente de tensión DC de alta impedancia.
Tensión de entrada = cte	La amplitud de la corriente de salida es independiente de la carga.
La tensión de salida no depende de la carga.	La amplitud de la forma de onda de la corriente de salida depende de la naturaleza de la impedancia de dicha carga.
Requiere diodos de retroalimentación	No requiere diodos de retroalimentación.
Circuito de conmutación complejo	Circuito de conmutación simple (debido a que únicamente está compuesto por condensadores).
Dispositivos como ahora los MOSFET de potencia, los IGBTs, etc. pueden ser utilizados en algún u otro circuito.	Inviabilidad a la hora de usar dispositivos tipo MOSFET, IGBTs, etc. Debido a que tienen que soportar las tensiones inversas.

Tabla 2.- Comparación VSC - CSC

2.1.2.2. Según el mecanismo de conmutación.

El objetivo del inversor es, tal y como se expone anteriormente, transformar una señal de continua a alterna. Esta etapa se lleva a cabo a través de la conmutación. Según su mecanismo, se distinguen los siguientes grupos:

- Push-Pull Inverters.
- Half-Bridge Inverters.
- Full-Bridge Inverters.
 - Monofásico.
 - Trifásico.

La conmutación del inversor es ejecutada por los transistores IGBTs. Es por ello que antes de desglosar los diferentes mecanismos de conmutación, se explica en qué consiste el IGBT.

Las siglas de este tipo de transistor provienen del inglés: Insulated Gate Bipolar Transistor, eso es, Transistor Bipolar de Puerta Aislada. Se trata de un dispositivo de estado sólido (no contiene elementos móviles) y está compuesto por tres terminales con capacidad de control externo. Su principal objetivo es dar continuidad al flujo de energía cuando ocupa el estado "ON" (1) y detenerlo cuando se encuentra en "OFF" (0).

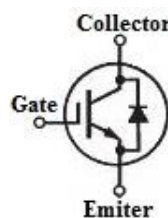


Fig. 7.- Esquema del IGBT.

El cambio de estado se obtiene a partir de la aplicación de tensión a un semiconductor, bloqueando o no el flujo de corriente según el siguiente argumento:

Cuando en el terminal Gate (puerta) aparece una tensión de referencia, el transistor se satura y permite la continuidad de flujo entre los terminales Collector (colector) y Emitter (emisor). En caso que no haya tensión en la entrada es decir, en el terminal Gate, no hay continuidad de flujo, puesto que por un lado el circuito está abierto y por el otro hay un diodo que corta el paso.

Presentado ya el elemento en el que se basa la etapa de conmutación del inversor, se puede proseguir a describir los principales mecanismos.

- **Inversor monofásico con transformador (*Push-Pull*).**

En estas estructuras, el polo positivo del Bus DC está conectado permanentemente a la toma media de un transformador (punto 0). El polo negativo se conecta alternativamente a los extremos A y B de dicho transformador, mediante los IGBTs 1 y 2, que van conmutando su estado. El transformador presenta un grado de utilización bajo en el devanado primario, por lo que no es aconsejable emplear esta configuración para circuitos de potencia superior a 10 kVA. La tensión resultante a la salida es una onda cuadrada de amplitud V_{dc} (en caso de estar evaluada respecto al origen); ello implica que el rango de amplitud es de $\pm V_{dc}$, por lo que los interruptores que componen este sistema deben estar dimensionados para $2V_{dc}$.

La tensión de salida no sólo depende de la tensión de la fuente DC, sino que también dependerá de la relación de transformación (N_1/N_2).

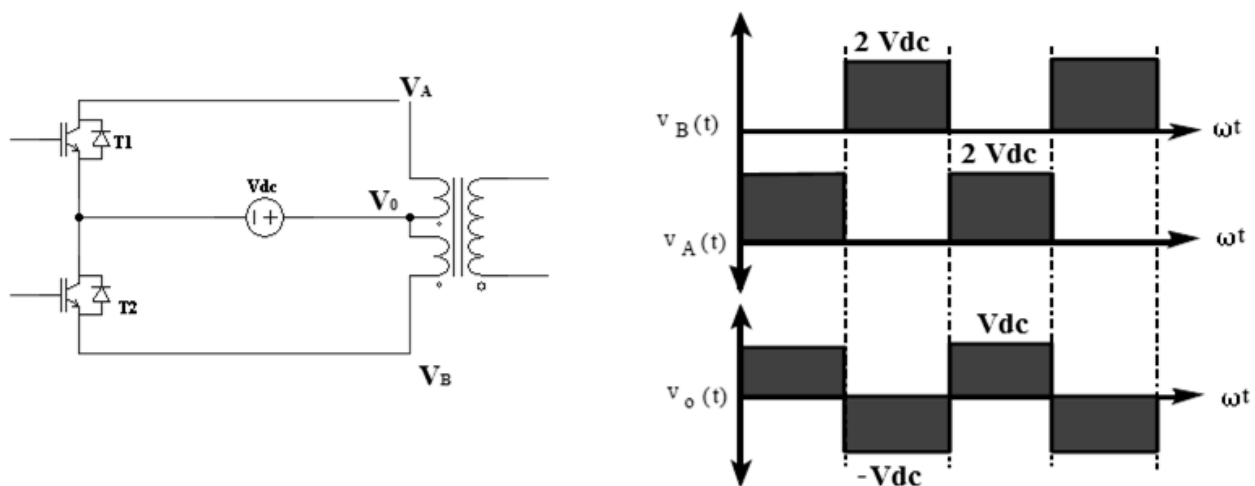


Fig. 8.- Esquema del inversor tipo Push-Pull (Izq.) y representación de la onda de salida (Der.)

- **Inversor monofásico de semi puente (Half-Bridge).**

En esta configuración, hay dos condensadores de iguales características conectados en serie. Ello implica que los IGBTs soportaran una tensión igual a V_{dc} en vez de $2V_{dc}$ ya que la tensión aplicada entre el nodo central de las dos capacitancias y uno de los dos extremos es de $V_{dc}/2$. Cuando el IGBT 1 está excitado y saturado (ofreciendo continuidad al flujo de corriente), la tensión en la carga será de $+V_{dc}/2$; mientras que cuando es el IGBT2 quien ofrece la continuidad de flujo, en bornes de la carga habrán $-V_{dc}/2$.

Esta configuración es más adecuada para elevadas tensiones del Bus DC que la anterior. Hay que tener en cuenta que la tensión en la carga es sólo la mitad que la del Bus DC. Aun y así, los IGBT deben estar dimensionados para el doble de tensión de salida (es decir, para V_{dc}).

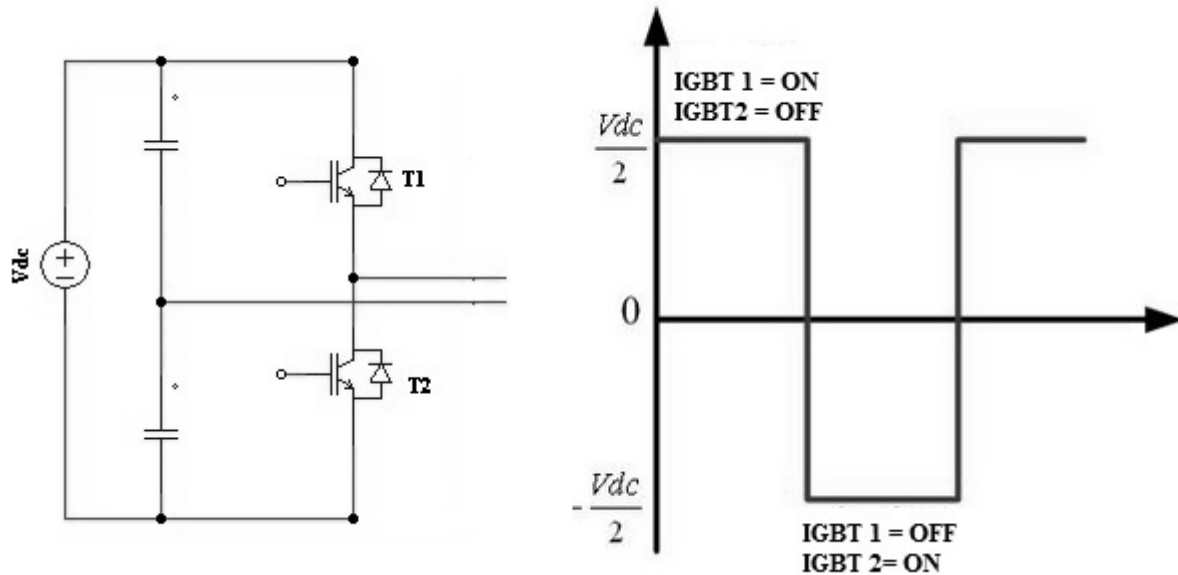


Fig. 9.- Esquema del inversor tipo Half-Bridge (Izq.) y representación de la onda de salida (Der.)

- **Inversor de puente completo (*Full-Bridge*).**

A partir de esta estructura de inversores se puede obtener una salida en AC monofásica o trifásica:

- **Monofásico.**

Esta configuración es semejante a la anterior, añadiéndole una rama de IGBTs, lo que permite referenciar el neutro de la carga. Con una tensión de entrada en el lado de continua determinada, la máxima tensión obtenida a la salida del inversor será igual al doble que en descrito anteriormente (Half-Bridge). Ello implica que para la misma potencia, la corriente de salida y las de conmutación serán la mitad que en el caso descrito anteriormente, lo que implica una gran ventaja de cara a trabajar con altas potencias.

Con el fin de evitar cortocircuitos, los IGBTs de una misma rama no pueden estar activados al mismo tiempo. Del mismo modo, si se activan al mismo tiempo dos IGBTs que estén en paralelo (es decir los dos de arriba o los dos de abajo), se produce un circuito abierto. Es por este motivo que la conmutación de los transistores se realiza en “diagonal”, es decir, que la conmutación del interruptor

1 siempre ira en sincronía con el 4, y el 2 con el 3 (según la nomenclatura seguida en la Fig. 10).

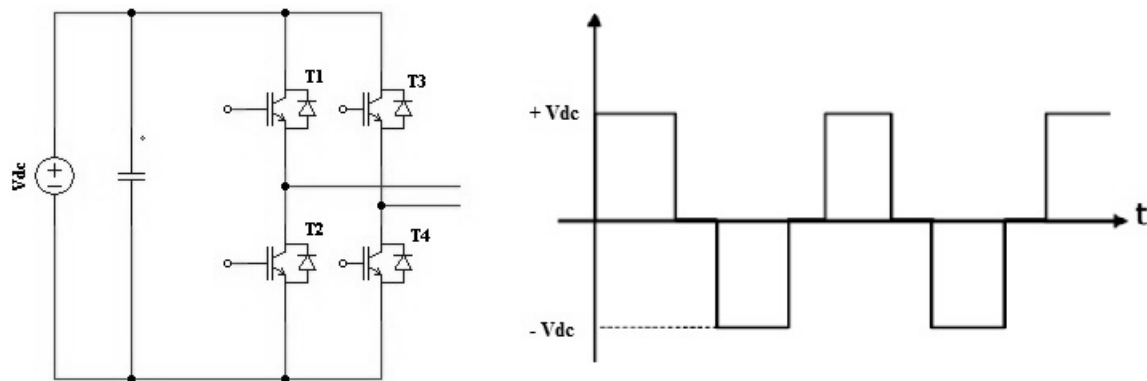


Fig. 10.- Esquema del inversor Full-Bridge con salida monofásica (Izq.) y representación de la onda en la salida (Der.).

A continuación se muestra una tabla de la verdad dónde se detalla el valor de la tensión de salida, según el estado de los diferentes transistores:

Transistores cerrados (permiten el flujo)	T1	T2	T3	T4
T1	X	0 (cc)	0 (ca)	V_{dc}
T2	0 (cc)	X	$-V_{dc}$	0 (ca)
T3	0 (ca)	$-V_{dc}$	X	0 (cc)
T4	V_{dc}	0 (ca)	0 (cc)	X

Tabla 3.- Tensión de salida en función de la conmutación de los IGBTs (Full-Bridge monofásico)

NOTA: Se ha usado (ca) para hacer referencia a Circuito Abierto y (cc) para CortoCircuito.

El motivo por el cual se produce un circuito abierto o un cortocircuito según una combinación u otra de los transistores, se explica gráficamente en la siguiente figura (Fig. 11) .

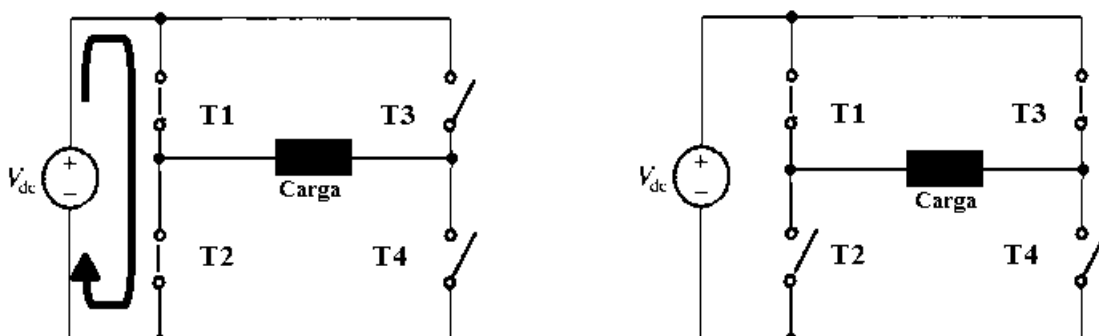


Fig. 11.- Justificación de los estados de Circuito Abierto (ca) y CortoCircuito (cc) según la conmutación de los IGBTs

○ **Trifásico.**

Si al mismo sistema se le añade una tercera rama, entonces la señal generada en el lado de corriente alterna es trifásica, teniendo a la salida el sistema trifilar con sus valores de fase y línea.

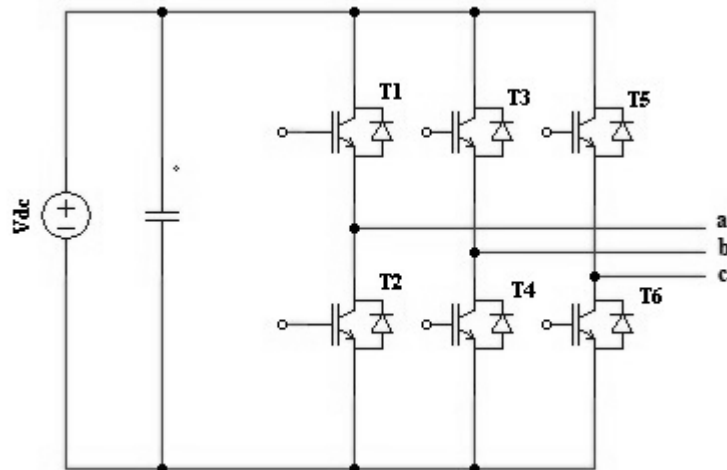


Fig. 12.- Esquema del inversor Full-Bridge con salida trifásica.

En este caso, la representación de la onda de salida, es la misma que en la Fig. 10 con la diferencia que la señal graficada es trifásica, lo que implica que hay tres ondas con un desfase de 120° entre ellas.

De todos los sistemas explicados, los inversores de puente completo (Full-Bridge) son los más utilizados ya presentan diferentes ventajas, entre las que se destacan:

- Mejor rendimiento. Respecto a los Push-Pull, presentan un rendimiento más elevado debido a que no presentan pérdidas añadidas a causa del transformador.
- Aprovechamiento total de la tensión del bus de continua. Respecto a los Half-Bridge, presentan un mejor aprovechamiento de la tensión del bus de continua, oscilando entre $\pm V_{dc}$, en vez de entre $\pm \frac{1}{2} \cdot V_{dc}$.

El hecho de usar el montaje monofásico o trifásico, dependerá del sistema al que tenga que alimentar el inversor. En el caso del actual proyecto, se trata de un sistema trifásico, por lo que la estructura de los transistores que monta es la Full-Bridge trifásico.

Con el objetivo de analizar el valor de la tensión a la salida, y siguiendo el mismo razonamiento que en el caso monofásico, se muestra una tabla de la verdad en la que se recogen los posibles estados de los transistores:

Transistores cerrados (permiten el flujo)	Tensión Nominal a la salida (V_{ab}, V_{ac}, V_{ca})
(T2,T4,T6)	(0,0,0)
(T1,T4,T6)	($V_{dc}, 0, -V_{dc}$)
(T2,T3,T6)	($-V_{dc}, V_{dc}, 0$)
(T2,T4,T5)	($0, -V_{dc}, V_{dc}$)
(T1,T3,T6)	($0, V_{dc}, -V_{dc}$)
(T1,T4,T5)	($V_{dc}, -V_{dc}, 0$)
(T2,T3,T5)	($-V_{dc}, 0, V_{dc}$)
(T1,T3,T5)	(0,0,0)

Tabla 4.- Tensión de salida en función de la conmutación de los IGBTs (Full-Bridge trifásico)

La numeración seguida en la nomenclatura de la Tabla 4 se corresponde con la que se ha usado en el esquema del puente completo trifásico (Fig. 12).

De entre todos los modelos mencionados, el que se estudia en el presente proyecto es este último (puente completo trifásico).

Una vez vistos los diferentes modelos de inversores electrónicos de potencia, y para finalizar con el estado del arte, se hace una breve explicación de los diferentes métodos de modulación (en forma de pulsos) con los que nos podemos encontrar.

2.1.3. Convertidores para minieólica.

El convertidor en el que se basa el proyecto es de una potencia nominal de 10kW, o lo que es lo mismo, la aplicación para la que se ha diseñado es la minieólica. Esta tecnología cuenta con diversas ventajas, como ahora:

- Posibilita el suministro de electricidad en puntos aislados y alejados de la red de distribución.
- Capacidad de generación de energía de forma distribuida (conocida como microgeneración distribuida). Esto consiste en generar energía en puntos intermedios entre las grandes centrales y las cargas o puntos de consumo, reduciéndose considerablemente las pérdidas de transporte y distribución.
- Tecnología más accesible, gracias a los bajos costes en comparación a la generación eólica de mayor potencia.

A nivel legislativo, la energía minieólica se cataloga en el mismo marco regulatorio y retributivo que la gran eólica lo que implica que, a pesar de ser conceptos de generación energética diferentes, se engloban dentro del Real Decreto RD 661/2007. La carencia de distinción entre ambas tecnologías perjudica considerablemente el desarrollo del sector minieólico. Aún y no estar estandarizado a legislativamente, se ha aceptado el concepto de la minieólica para aquellas instalaciones cuya potencia nominal se halla comprendida entre los 0 y 100kW.

Una vez presentados los tipos de convertidores eléctricos de potencia, clasificados según diferentes parámetros, el que se estudia en este proyecto pertenece a los siguientes grupos:

- **Según parámetro de entrada:** Voltage Source Converter.
- **Según mecanismo de conmutación:** Full-bridge three-phase inverter.

2.2. Control del sistema.

En el punto anterior se presentan los diferentes tipos de inversores, llegando a especificar y justificar qué modelo es el que se usa para el desarrollo del proyecto. La etapa de control del inversor se basa en la comparación de una consigna o entrada (valor al que se quiere llegar) con la señal real (valor medido a la salida del inversor) y el tratado de dicha comparación.

Si la base del control de un inversor es la comparación de una señal de salida (medida) con una de entrada (referencia), es porque a la salida se está obteniendo ya una señal trifásica. Es por este motivo que antes de entrar a explicar la estrategia de control debe mencionarse el método para generar dicha señal.

2.2.1. Modulación del ancho de pulsos (PWM).

La conversión de corriente continua a alterna se realiza a través de la conmutación de los transistores. Esta conmutación viene conducida según la comparación de dos ondas.

El término Modulación del ancho de pulso, viene de las siglas PWM (que corresponden a *Pulse Width Modulation*), y su objetivo es controlar la cantidad de energía que se envía hacia la salida del inversor.

La base de este tipo de modulación es comparar una tensión de referencia sinusoidal que pulsa a la frecuencia que se desea obtener en la salida (50 Hz para Europa) con otra señal, normalmente triangular, que determina la frecuencia de conmutación (*switching frequency*). La frecuencia de la onda triangular debe ser, como mínimo 20 veces mayor que la frecuencia de la onda de referencia para obtener una señal mínimamente aceptable, una vez realizado el correspondiente filtraje. El valor medio de la señal obtenida a la salida del inversor viene determinado a partir del control de la modulación, es decir, actuando sobre el tiempo de duración de los estados ON y OFF de los transistores.

A continuación se muestra un montaje realizado con PSim dónde se pueden reconocer los diferentes elementos citados, así como su conexión:

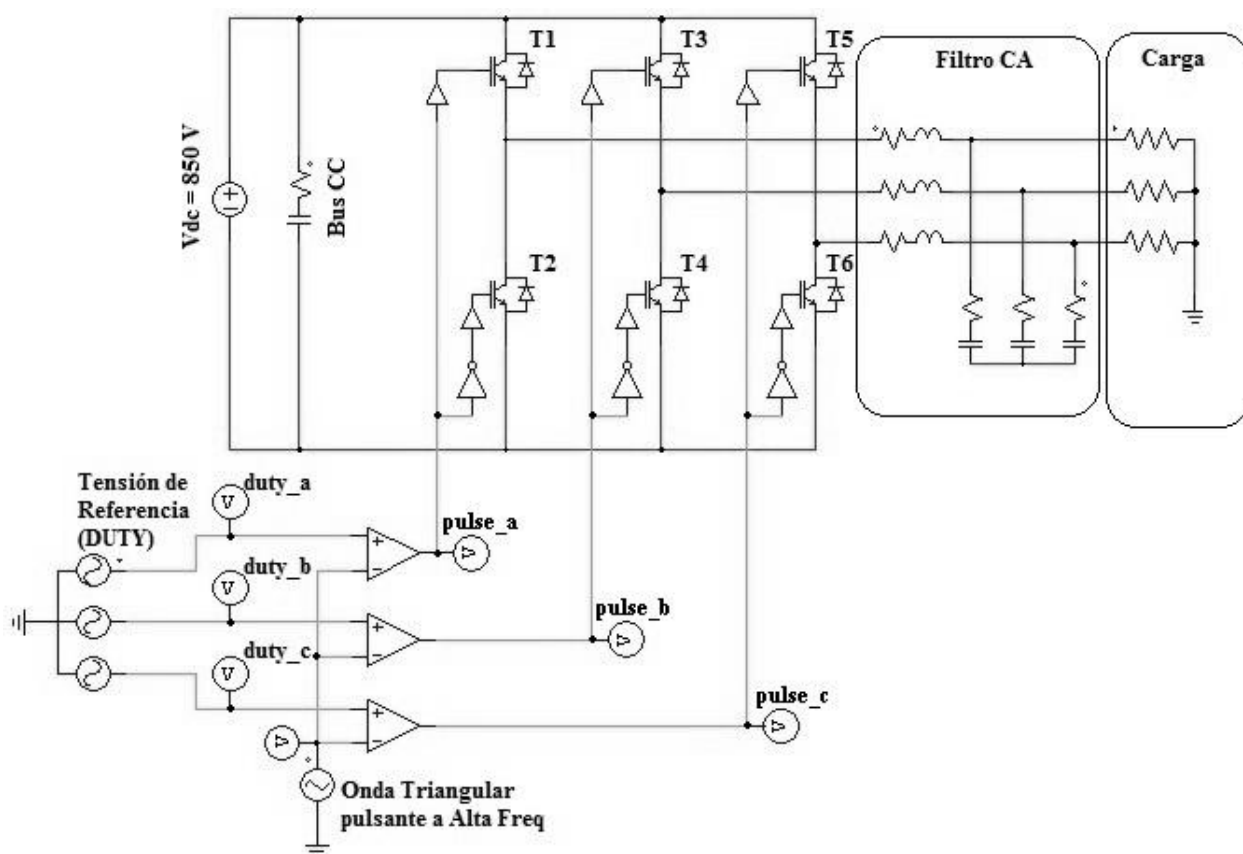


Fig. 13.- Montaje de un inversor trifásico puente completo con los elementos que intervienen en el PWM

A partir de la simulación temporal del esquemático de PSim correspondiente a la Fig. 14, se observa el comportamiento del inversor, para cada una de las diferentes etapas:

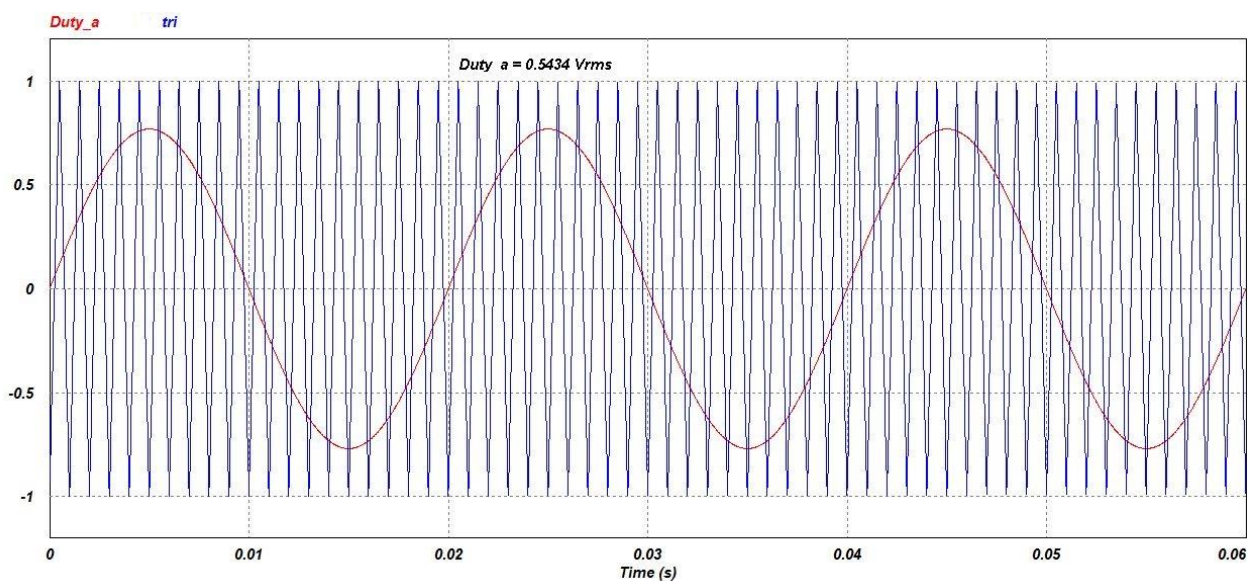


Fig. 14.- Comparación de la tensión portadora (Vtri) con la tensión sinusoidal de referencia (Duty).

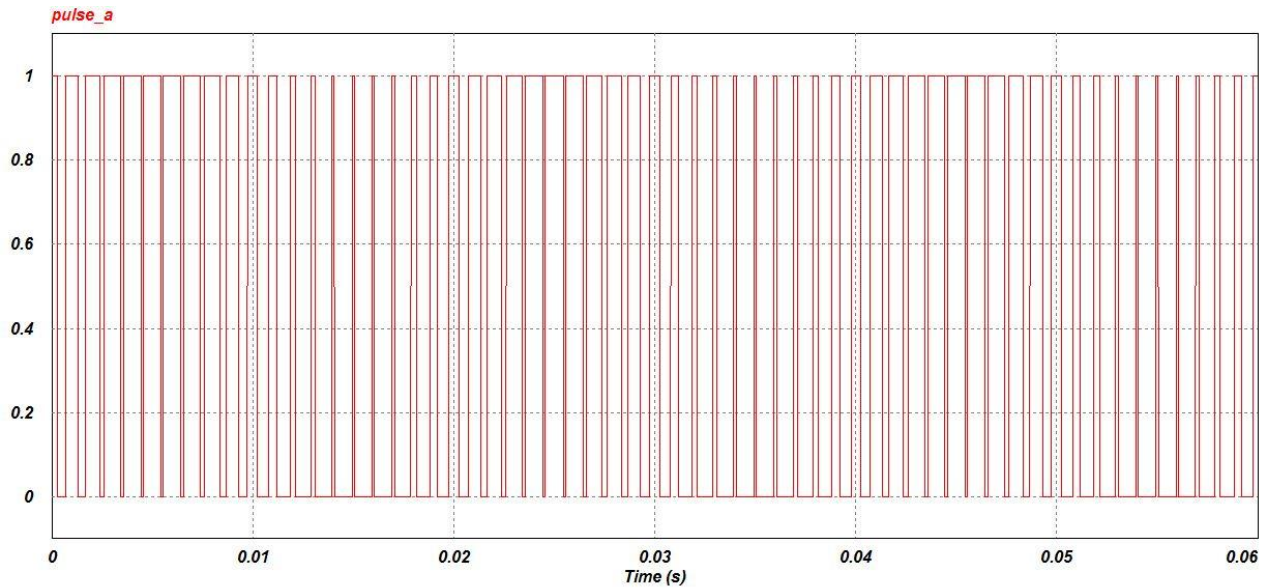


Fig. 15.- Resultante tras la comparación entre la portadora y el Duty.

Una vez realizada la comparación entre la onda portadora y la de referencia, se obtiene una señal en forma de pulsos lógicos que activa y desactiva los diferentes interruptores de potencia. Como se puede observar, valdrá 1 (activando el transistor superior de la rama) cuando el Duty está por encima de la onda portadora y 0 (activando el transistor inferior de la rama) en el caso contrario.

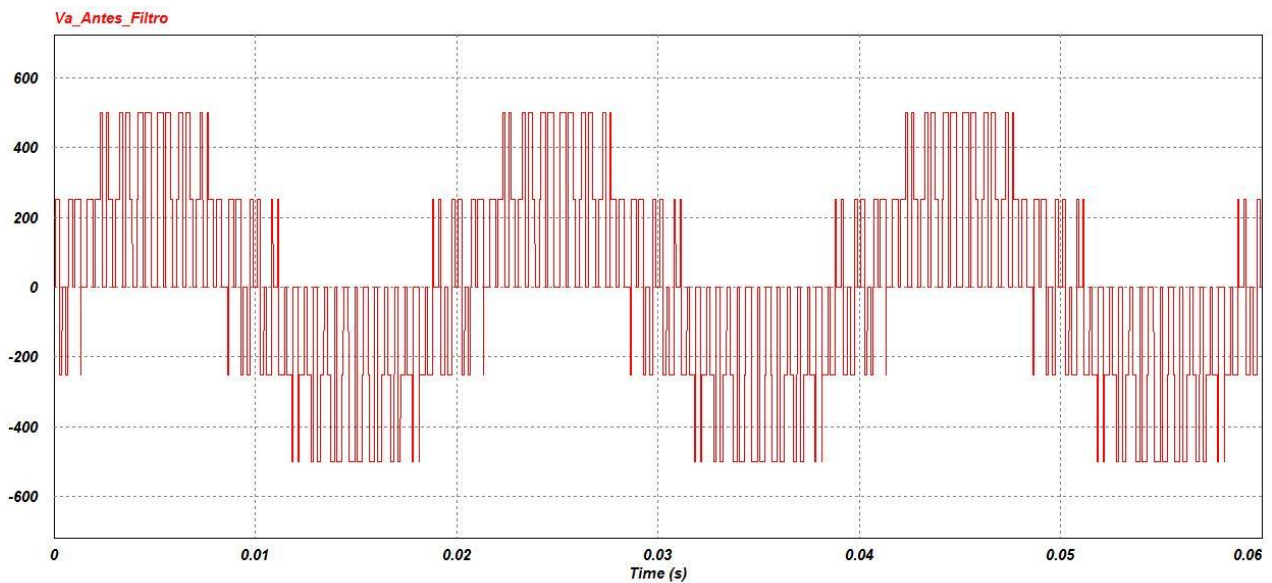


Fig. 16.- Señal a la salida del inversor (valor de línea).

El siguiente elemento por el que pasa el flujo, es el transistor. En este caso se observa la onda sinusoidal de una de las tres ramas.

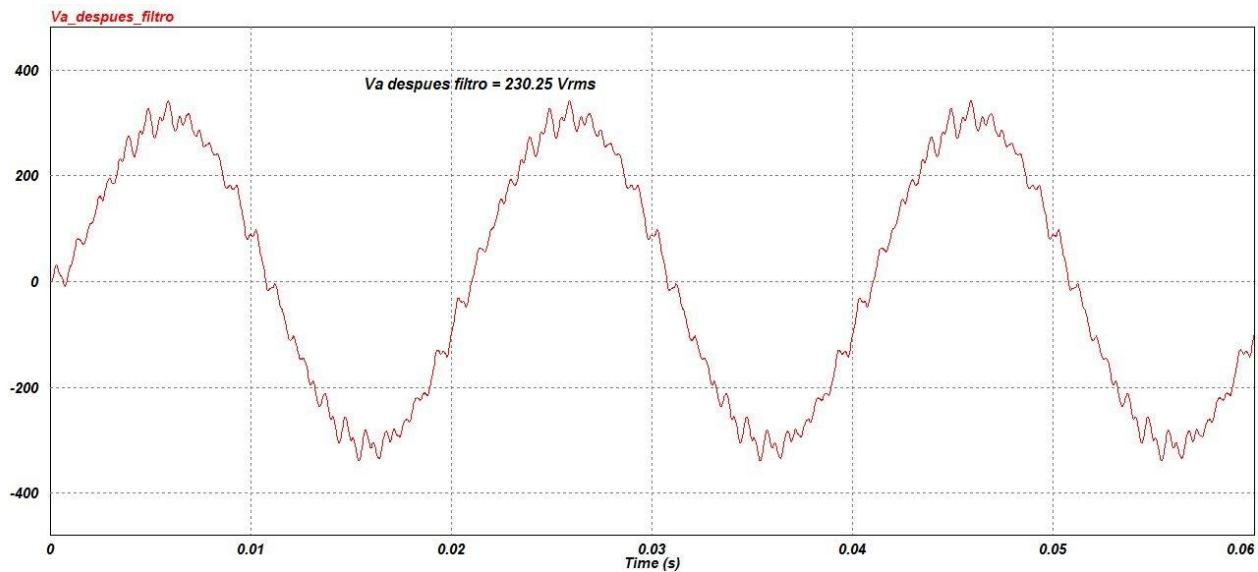


Fig. 17.- Señal después de haber pasado por el Filtro LC.

El último elemento por el que pasa la señal es un filtro LC o LCL (variará según el diseño del inversor). La baja resolución de la onda obtenida es debida a que la frecuencia de conmutación se ha establecido en 1kHz para poder ver bien el fenómeno de la conmutación. Aumentando esta frecuencia se llega a obtener una sinusoidal perfecta.

El valor de la señal obtenida a la salida del inversor, teniendo en cuenta la conmutación y todos los elementos que intervienen en ella, se justifica a partir de la siguiente expresión:

$$V_{AC, fase} = \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{dc} \cdot V_c}{V_{tri}} = 0.50 \cdot \frac{850 \cdot 0.5434}{1} \rightarrow V_{AC, fase} = 230.82 \text{ Vrms}$$

2.2.2. Etapa de control.

El mecanismo que se ha explicado en el punto anterior (PWM) es el encargado de generar una señal en alterna (tensión de salida del inversor) a partir de la combinación de una señal en continua (Vdc) y la acción de los transistores.

Una vez se ha obtenido una señal a la salida del inversor, ésta debe ser controlada de algún modo. Para lograrlo es necesario realizar lecturas sobre ella misma y corregirla según su valor; es decir, hay la necesidad de realimentar.

2.2.2.1. Necesidad de realimentación en la etapa de control.

Es muy importante, de cara a la calidad de la energía entregada por el inversor, limitar los armónicos generados para restringir los efectos adversos sobre la calidad de la red eléctrica. La etapa del control de corriente juega, en este aspecto, un papel importante, ya que es la encargada de realizar el seguimiento de la señal generada, procurando limitar la distorsión armónica (THD), así como su magnitud, a los valores dictaminados según los estándares Europeos (IEC).

Es por este motivo que la realimentación en sistemas de control, resulta imprescindible debido a la existencia de perturbaciones de carga sobre el proceso a controlar; por lo que hay la necesidad de informar al controlador que la consigna y la variable del proceso (salida) difieren. A esta diferencia (conocida como error) se le aplica una determinada acción correctora (a través del controlador) para obtener a la salida una señal estable.

A continuación se muestra un esquema del proceso descrito:

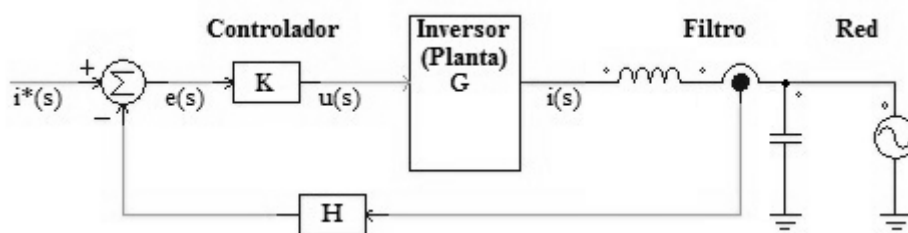


Fig. 18.- Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.

De donde se deducen los siguientes elementos:

- $i^*(s)$: Consigna, también conocida como referencia. Es la señal de entrada del sistema.
- $i(s)$: Salida. Es la señal obtenida una vez realizada la acción de control. Sobre ella se realizan las medidas.
- $e(s)$: Error. Es la diferencia entre la consigna y la señal de salida.
- K : Controlador. Tratamiento del error con el objetivo de obtener una respuesta estable del sistema.
- $u(s)$: Tensión. Se obtiene a partir de la transformación del error mediante la acción de control.
- G : Planta (en nuestro caso es el inversor). Elemento sobre el que se desea actuar.
- H : Lectura. Sensor encargado de mostrar el comportamiento de la señal a la salida de la planta.

En el caso concreto que nos ocupa, se está realizando un control de lazo cerrado sobre la corriente. Es por este motivo que la señal de entrada y de salida se denominan $i^*(s)$ e $i(s)$ respectivamente (haciendo referencia a “intensidad”).

2.2.2.2. Tipos de controladores.

La generación de energía a partir de fuentes renovables como la eólica está en constante crecimiento. Por este motivo es importante limitar la cantidad de armónicos generada por los convertidores que intervienen en la etapa del procesamiento de la potencia generada.

Los dos controladores más utilizados para lograr dicho equilibrio en el lazo de control de corriente de los sistemas de generación energética renovable, son los PID y los PR. A continuación se presentan sus características:

- **PID**

La gran mayoría de sistemas están regulados mediante los controladores conocidos como PID (Proporcional Integral Derivativo).

La señal de entrada debe ser percibida como una cierta función matemática. En este caso, el funcionamiento del controlador se basa en tres operaciones lineales sobre la función de entrada: multiplicarla (componente Proporcional), integrarla (componente Integral) y finalmente Derivarla (componente Derivativa) con el objetivo de reducir el error a cero en una forma y tiempo determinados.

A continuación se presentan más detalladamente:

- Acción proporcional: actúa de forma instantánea sobre el error, multiplicándolo por un valor constante. A nivel matemático se describe como:

Dominio temporal (t)	Dominio continuo – Laplace (s)
$u(t) = K_p \cdot e(t)$	$U(s) = K_p \cdot E(s)$

- Acción integral: evoluciona a lo largo del tiempo cuando hay un error, acumulándolo en su salida. A nivel matemático se describe como:

Dominio temporal (t)		Dominio continuo – Laplace (s)
$u(t) = K_i \cdot \int e(t) dt$		$U(s) = K_i \cdot \frac{1}{s} \cdot E(s)$

- Acción derivativa: toma presencia cuando el valor del error varía, la salida de este bloque es proporcional a la variación de dicho error. A nivel matemático se describe como:

Dominio temporal (t)		Dominio continuo – Laplace (s)
$u(t) = K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$		$U(s) = K_d \cdot s \cdot E(s)$

- **PR**

En el punto anterior se habla sobre el controlador PID. No obstante, es frecuente su implementación sin la componente Derivativa, resultando ser un sistema PI en vez de PID. El principal motivo por el que se desestima la parte Derivativa es porque el controlador elimina igualmente el error llegando a proporcionar una salida estable, resultando ser un sistema mucho más simplificado a nivel de cálculos y sintonización.

La estrategia de control que se diseña en el presente proyecto, parte de la base del controlador PI, sustituyendo la componente Integral por una componente Resonante. Esto es, el Controlador PR (Proporcional Resonante).

Uno de los mayores inconvenientes del controlador PI en general, es que no es capaz de seguir una referencia sinusoidal sin error estacionario, debido a la dinámica del término Integral. La incapacidad para seguir una referencia de esa naturaleza provoca la necesidad de utilizar la tensión de red como un término feed-forward, para así obtener una buena respuesta dinámica.

Por otro lado, el controlador PR no sufre el problema mencionado anteriormente, ya que proporciona la ganancia a una cierta frecuencia (frecuencia de resonancia), evitando aplicarla a las otras frecuencias. Así pues, su funcionalidad consiste en introducir una ganancia infinita a la frecuencia seleccionada, con el objetivo de eliminar el error estacionario a dicha pulsación, obteniendo de este modo a la salida, una señal periódica al ritmo de la frecuencia resonante.

A nivel matemático, y en el dominio continuo (*Laplace*), el controlador PR se define según la siguiente expresión, para el caso considerado como ideal:

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \cdot \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$$

En este caso, se proporciona una ganancia infinita a la frecuencia AC de ω_0 , sin ganancia de fase para las demás frecuencias. El hecho de obtener tal ganancia puede provocar problemas de estabilidad.

Para evitar los problemas inducidos a causa de una ganancia infinita, se debe añadir un término de amortiguamiento (*damping*):

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \cdot \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2}$$

Donde:

- K_p : Ganancia Proporcional. Determina la dinámica del controlador.
- K_r : Ganancia Resonante. Determina la amplitud de ganancia a la frecuencia seleccionada y controla el Ancho de Banda (BW) a su alrededor.
- ω_0 : Frecuencia de Resonancia.
- ω_c : Representa el Ancho de Banda (BW) a -3dB de la frecuencia de corte.

Para este caso, la ganancia a la frecuencia AC de ω_0 no es infinita, pero igualmente sigue siendo lo suficientemente elevada como para que el error estático tome un valor reducido.

2.2.2.3. Estructura del control seleccionado.

Una vez presentados los diferentes tipos de control aplicables, a continuación se presenta el control que integra el inversor que se estudia en el proyecto.

La estrategia del control aplicada para las simulaciones, es la que se muestra en la Fig. 18. La parte que se encarga de garantizar la estabilidad de la respuesta es el controlador Proporcional Resonante, que si se analiza más detalladamente, se observa que está compuesto por los siguientes elementos:

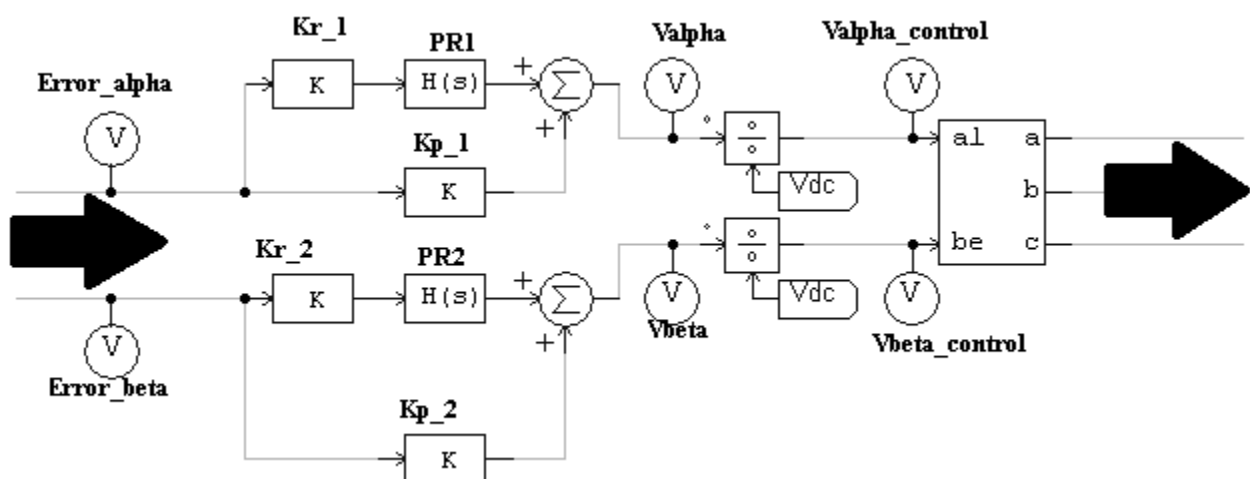


Fig. 19.- Circuito equivalente Controlador PR.

De la Fig. 19, se observa:

- Control de la señal efectuado sobre los ejes de referencia $\alpha\beta$.
- Se dispone de un controlador por eje. Usar el mismo para ambos no sería correcto ya que se encuentran desfasados 90° entre sí.
- Ecuación del controlador (el modelo finalmente aplicado corresponde con el NO-SIMPLIFICADO de los presentados en la página anterior) aplicada mediante asociación de bloques matemáticos, de la que se deduce que:
 - o Kp_1 y Kp_2 son la ganancia proporcional para cada eje.
 - o Kr_1 y Kr_2 son la ganancia resonante para cada eje.
 - o PR1 y PR2 bloque que contiene la función del polinomio de grado 2.
- A la salida del controlador se dispone de la tensión estabilizada en referencia $\alpha\beta$.
- El cociente entre dicha tensión y la del bus de continua da lugar a la tensión de control (o *duty*).
- Finalmente se realiza una conversión de ejes ($\alpha\beta - abc$) para obtener la señal de control deseada a la entrada de la modulación de ancho de pulsos (PWM).

- **Planta**

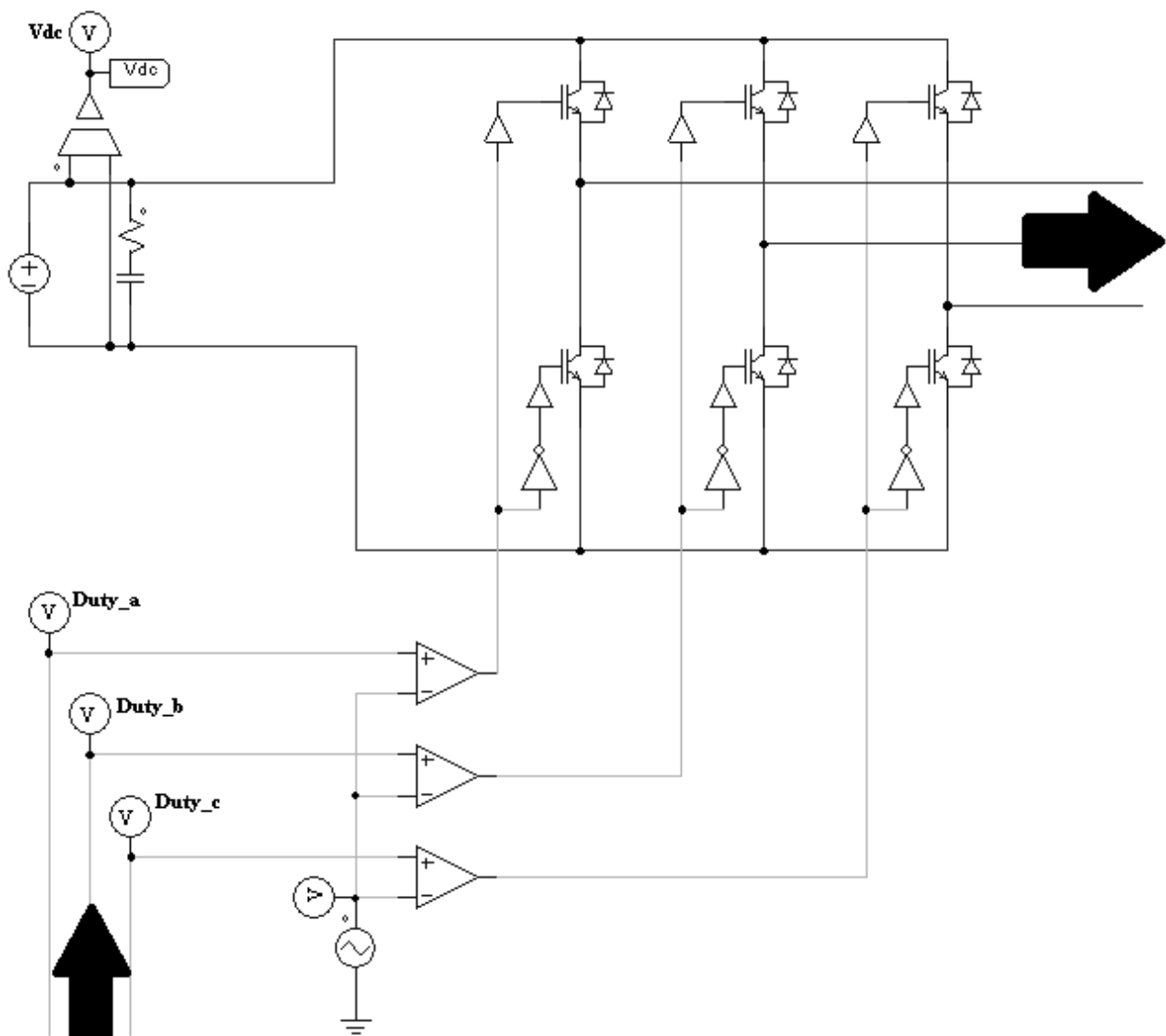


Fig. 20.- Pulse Width Modulation. Planta del inversor.

La siguiente etapa, una vez se ha tratado la señal, es la modulación. A la salida de esta fase, la señal es del tipo trifásica y alterna, pero aún no puede ser inyectada a la red. Para ello, debe pasar por un filtrado. Es por este motivo que, el siguiente elemento que aparece en el montaje es el filtro (en este caso, filtro LC).

- **Filtro**

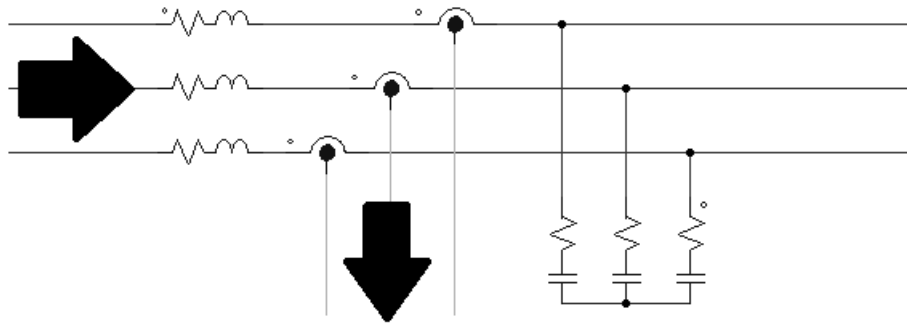


Fig. 21.- Filtrado señal AC (Filtro LC).

Una vez se ha superado esta etapa de filtrado, la señal ya puede ser inyectada a la red eléctrica, cumpliendo con los requisitos marcados según las normativas en cuanto a armónicos de frecuencia, calidad de la onda, etc. De esta etapa también se toman las medidas de la tensión mediante sondas, para dar paso a la siguiente y última etapa de la parte de control, que es la realimentación.

- **Realimentación**

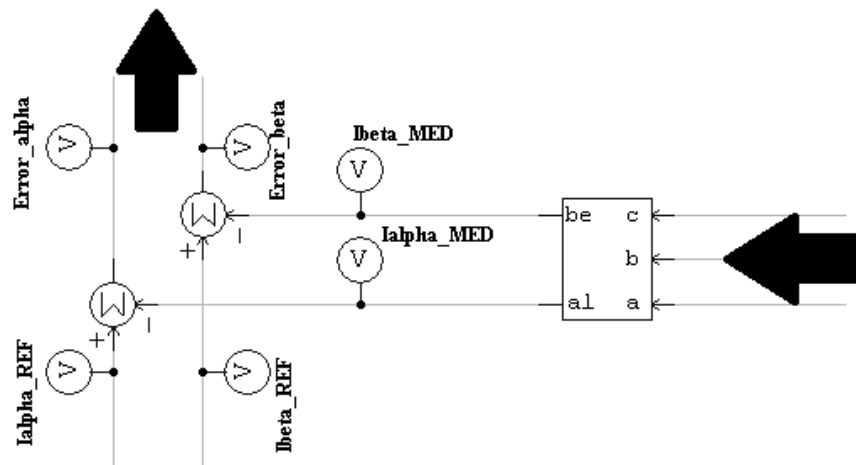


Fig. 22.- Etapa de Realimentación.

Etapa en la que se realiza la comparación entre la señal obtenida a la salida (a partir de la captación de la señal mediante sondas) y la señal de referencia. Antes de realizar dicha comparación, se realiza una transformación de referencia (giro $abc - \alpha\beta$), para tener en los mismos ejes la señal de consigna con la leída a partir de las sondas.

El resultado obtenido tras comparar ambas señales se conoce como error, que es lo que posteriormente será tratado en el controlador. A continuación (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se presenta el montaje final, que integra los bloques anteriormente descritos y en el que se puede observar la estructura del circuito de control seleccionado.

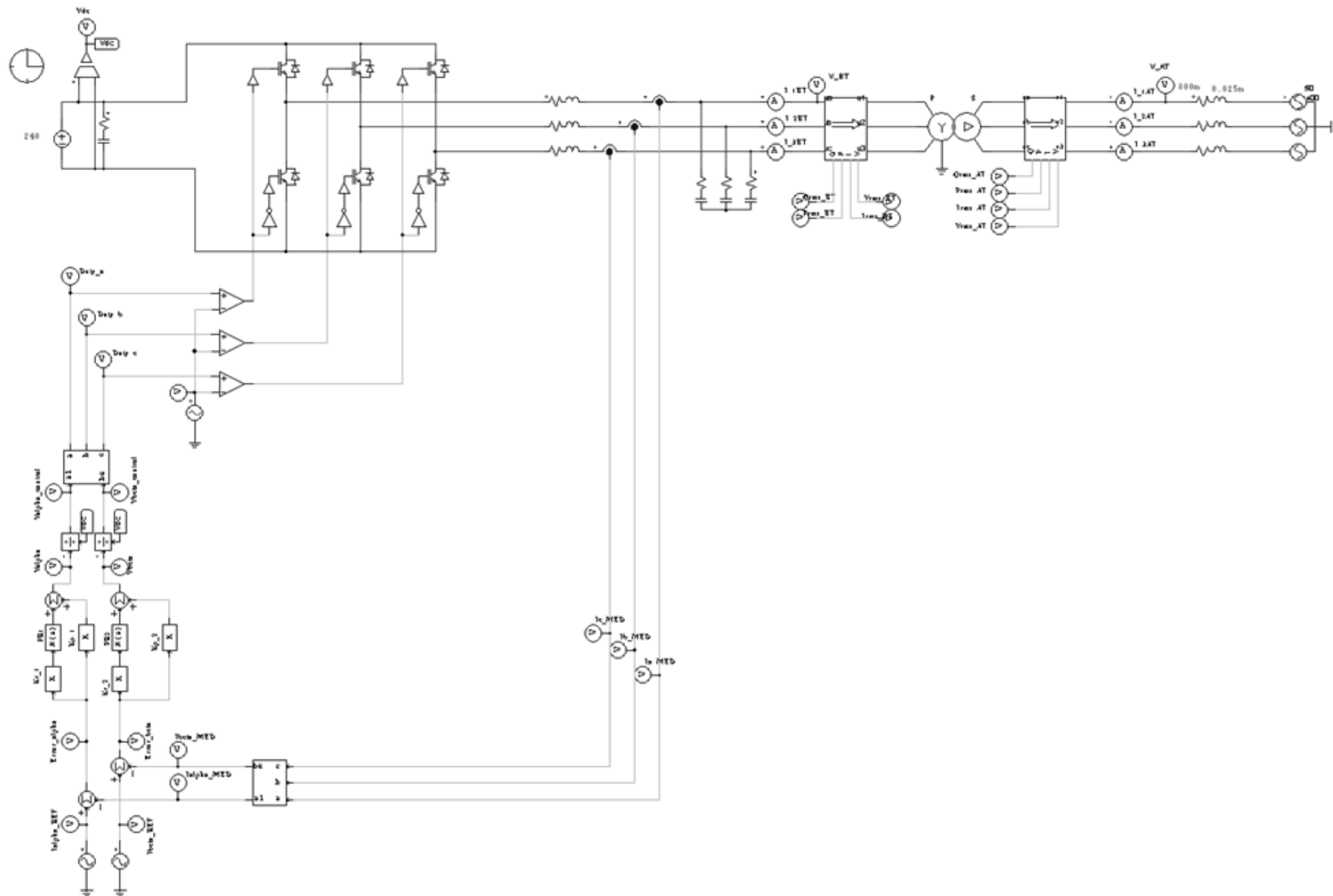


Fig. 23.- Montaje final. Parte de control + Parte de potencia.

CAPÍTULO 3.

Elementos del Sistema.

En el capítulo anterior se presenta el estado actual de la tecnología en el campo de la generación eólica. También se muestra el concepto del inversor (en qué se basa el mecanismo), así como la estrategia de control, es decir, a nivel de Software.

A continuación, se pasa a describir el montaje del inversor a nivel de Hardware; es decir, se explican todos aquellos elementos tangibles de que consta el inversor.

Antes de entrar a describir cada una de las partes que componen el inversor, se presenta una tabla-resumen con el objetivo de especificar las principales características técnicas del convertidor, así como de sus elementos:

ELEMENTO	VALOR
Tensión de régimen Bus de Continua	240 V
- Tensión mínima Bus de Continua	100V
- Tensión máxima Bus de Continua	300V
Tensión AC Nominal	133 Vrms
Corriente Nominal	50 Arms
Frecuencia AC	50 Hz
Transformador Elevador	Dyn11, 400/133,33 Vrms @50Hz
Inductancia Filtro AC	220 μ H
Capacitancia Filtro AC	12 μ F, conexión Estrella (Y)
Capacitancia Bus DC	2200 μ F

Tabla 5.- Tabla de Características del Inversor.

El **Convertidor DC-AC (o inversor)** es el elemento encargado de transformar la señal de corriente continua a corriente alterna. Es donde la parte de Software acciona y regula los componentes que componen el Hardware.

En este caso, el inversor es de una potencia nominal de 10kW, y genera una señal trifásica, a la frecuencia fundamental de la red (50Hz) y una tensión de 133 VRMS, con una corriente de 50 ARMS. Es por este motivo que en el lado AC (tras el filtrado de la señal) tiene integrado un transformador elevador Dy que convierte los parámetros de salida del inversor a los que se requeridos (230 VRMS por fase / 400 VRMS de línea).

Por otro lado, la tensión de régimen DC con la que se trabaja a la entrada toma un valor de 240 V, aceptándose un valor mínimo de 100 V y un máximo de 300 V.

A continuación se analizan de forma detallada y justifican los diferentes elementos que componen el inversor.

3.1. Condensador lado DC: Bus de continua.

La señal que llega a la entrada del convertidor, funcionando como inversor, es (tal y como se ha comentado anteriormente) en continua. El primer elemento que interviene en el tratado de dicha señal es un condensador electrolítico, cuya función básica es la de almacenar energía sustentando un campo eléctrico.

En el caso del inversor estudiado, la capacidad del lado de continua se compone de cuatro condensadores electrolíticos de una capacidad global de 2200 μF . Esta tecnología de condensadores utiliza un electrolito como su primera armadura, actuando como cátodo. A continuación, con la tensión se crea un diferencial de potencial, gracias a una capa dieléctrica depositada sobre la segunda armadura (ánodo). Este tipo de condensadores sólo se encuentran en circuitos de corriente continua, ya que la polarización inversa provocada por las corrientes del tipo alterna, destruyen el dieléctrico, produciendo un cortocircuito entre ánodo y cátodo.

Existen varias tipologías de condensadores electrolíticos, según su ánodo y cátodo:

- Condensadores de aluminio. Muy utilizados en fuentes de alimentación conmutadas.

- Condensadores de tantalio. Destacan por tener unas pérdidas muy bajas y su excelente relación capacidad/volumen.
- Condensadores bipolares. Diseñados para trabajar con corriente alterna, aunque resultan inservibles para altas frecuencias.

Los condensadores del lado DC forman el componente conocido como bus de corriente continua, y su finalidad es estabilizar la tensión de entrada en el bus, para poder ofrecer un flujo continuo de energía. De no existir dicho componente, la energía enviada hacia los IGBTs sería fluctuante e irregular ya que dependería únicamente del comportamiento del recurso primario (que para el caso concreto de este inversor es el viento).

3.2. Resistencia de frenado (*Braking Resistance*).

Es necesario incluir, en el montaje del convertidor, una serie de resistencias para evitar un supuesto descontrol de la turbina ante posibles rachas de viento, o ante el posible caso de generar más energía de la que se está consumiendo. Este tipo de resistencias se conocen como Resistencia de Frenado (*braking resistance*).

Su función es evitar un eventual caso en que la turbina se embale por exceso de energía a la entrada en comparación a la que se consume, realizando así una conversión del potencial no deseado en forma de Energía Cinética en forma de calor en forma de Energía Térmica, al mismo tiempo que se crea un efecto de frenado (que es el objetivo principal de la aplicación de dicha resistencia). A menudo, dicha conversión se reutiliza para otras aplicaciones como ahora la de calentar agua sanitaria.

Como se puede observar a continuación (Fig. 24), en la misma rama de la resistencia hay un contactor (K1). Este elemento es accionado de manera automática (comandado por el control) siempre que la tensión en el Bus DC sea superior al nivel máximo aceptado. Por el contrario, cuando dicho voltaje disminuye a un nivel seguro, la carga resistiva se desconecta del circuito (a partir de la acción de K1).

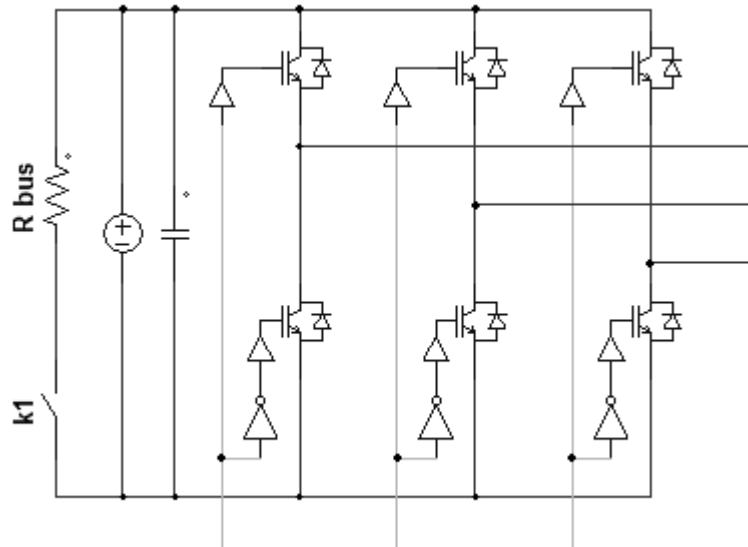


Fig. 24.- Conexión de la Resistencia de frenado del bus de continua. ($R_{bus} = 5 \Omega$)

El valor equivalente de la resistencia que se ha instalado en el convertidor para controlar el comportamiento dinámico de la turbina es de **5 Ohm**. Sabiendo que la tensión nominal para la que se ha dimensionado el Bus DC es de 240 Vdc, y que la potencia del convertidor es de 10kW, se demuestra que, efectivamente, la resistencia está bien dimensionada:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{240^2}{5} = 11520 \text{ W} \quad \rightarrow \quad P = 11,52 \text{ kW}$$

Se observa que la potencia que es capaz de disipar es de 11,52kW; lo que implica que la resistencia de frenado dinámico está algo sobredimensionada (aspecto positivo).

3.3. Pletinas de cobre.

La conducción de la corriente entre el condensador del bus y los transistores (IGBTs) se realiza mediante dos pletinas de cobre (una para el polo positivo y otra para el negativo), que se encuentran separadas mediante una capa aislante.

Hay que tener en cuenta que, todo y estar trabajando con corriente continua, la conmutación de los transistores a alta frecuencia, conlleva la aparición de una corriente oscilante a muy alta frecuencia, del tipo inductiva, que al ser conducida mediante pletinas en vez de cables, tiene un efecto mucho menor. En caso de

circular por conductores tipo cable, los efectos electromagnéticos de dichas corrientes llegarían a dañar los elementos más delicados, como es el caso de los aparatos de medida y el bloque de control.

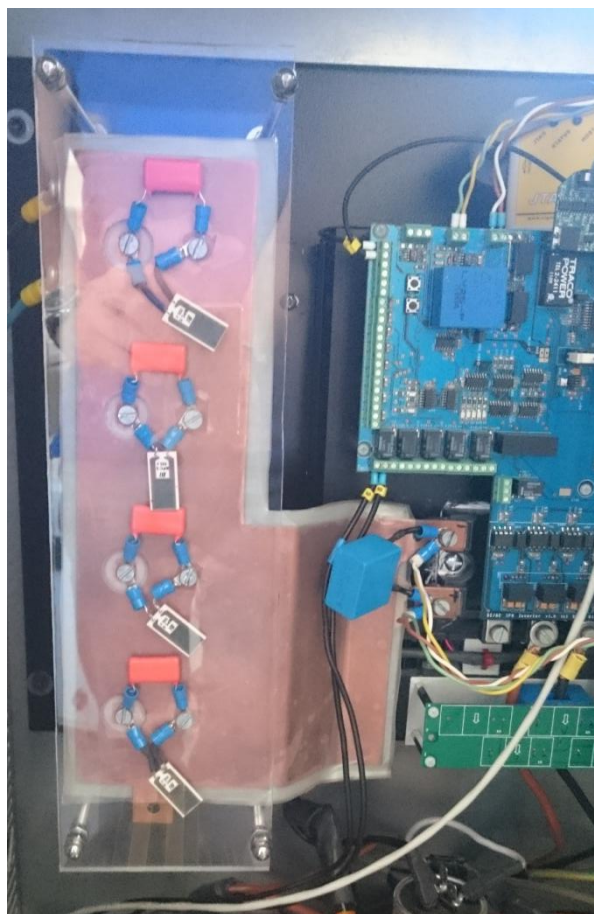


Fig. 25.- Conducción de la corriente continua mediante pletinas de cobre

En la imagen anterior (Fig. 25) se aprecia la parte superior de las pletinas de cobre que realizan la conducción de la corriente continua. A la parte izquierda superior se aprecia la entrada (dos conductores, uno para el polo positivo y otro para el negativo). A la parte inferior derecha se observa la salida, también a modo de dos conductores.

3.4. Comunicación con el PC.

El control del convertidor (activando unas salidas u otras en función de diferentes parámetros de entrada) es el código del programa que se ha diseñado. Para ello, se dispone de un protocolo de comunicación (encargado de transmitir información entre dos o más entidades de un sistema por medio de la variación de

determinadas magnitudes físicas) y un proyecto (programado en lenguaje C# desde el cual se ejecutan las diferentes operaciones).

A continuación se mencionan y justifican los elementos que intervienen en el control y en la comunicación PC-convertidor:

3.4.1. Proyecto en lenguaje programado.

El hecho que el inversor esté controlado a partir de un ordenador, es posible gracias a que existe un proyecto en lenguaje programado. Para ejecutar dicho proyecto (software) y controlar el inversor (hardware), es imprescindible un protocolo de comunicación en el que se valide que todos los elementos estén listos para empezar a funcionar.

Una vez se ha realizada la validación y no ha dado ningún error (es decir que se tienen todos los periféricos listos) se puede proceder a la ejecución del proyecto y al control del inversor, activando las dos fuentes que lo alimentan: Por un lado la fuente de CC que alimenta al bus del inversor, y por otro la de AC que simula la red a la que se inyecta la potencia procesada.

Una vez ejecutado el programa que controla el inversor, se sigue una cierta lógica (Máquina de Estados), que activará o desactivará diferentes etapas del inversor (Estados) según los parámetros de entrada y salida. Este elemento se trata más a fondo en el siguiente capítulo (Apartado 0), dónde se explica toda la parte de Software que compone el convertidor.

3.4.2. Tarjeta de control.

La tarjeta de control es el elemento físico que realiza la comunicación entre los diferentes componentes de la parte de control del inversor. En ella se hallan las ranuras para incorporar el JTag, DSP (des de donde se controla la pastilla de potencia y demás periféricos), así como las salidas de relé adicionales y un *display 7 segmentos* (que informará al operario bajo qué estado se encuentra operando en todo momento el convertidor).

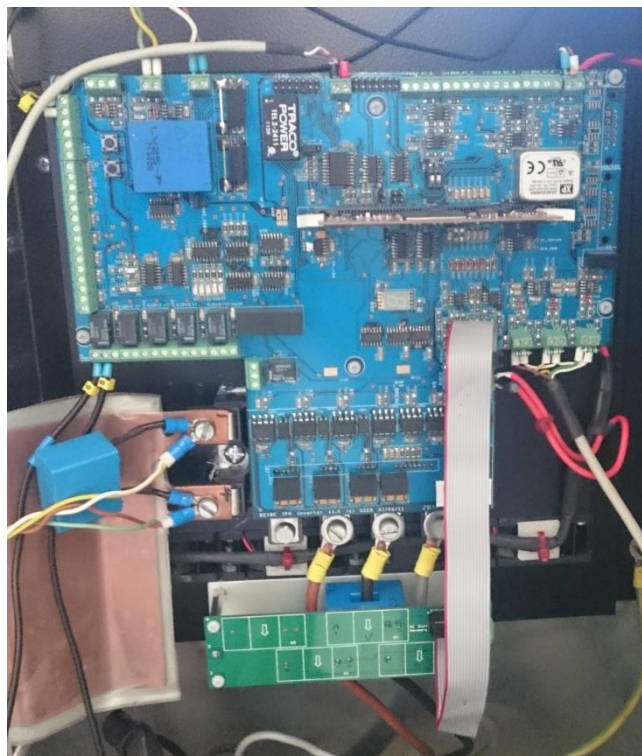


Fig. 26.- Tarjeta de control con los diferentes periféricos conectados.

En color azul se distingue la placa (o tarjeta) de control. A parte, se puede observar también a la izquierda de la imagen, la llegada de la corriente continua a partir de las pletinas de cobre anteriormente descritas. Por otro lado, se puede observar, a la parte inferior, la salida de la corriente alterna trifásica, a modo de tres conductores (uno para cada fase).

3.4.3. JTag.

El JTag (del inglés, *Joint Test Action Group*) es el elemento físico que se encarga de vincular el ordenador con la parte de control del inversor (mediante un puerto USB) y tanto puede utilizarse para emulaciones (con el objetivo de comprobar que el código funcione correctamente y que los diferentes parámetros estén correctamente sintonizados), como para implementaciones reales (como es el caso del actual proyecto, en el que se controla un inversor de potencia).

Se trata de un elemento que se estandarizó en 1990 dentro de las normativas del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) con el objetivo de dar solución a los problemas a la hora de fabricar los circuitos impresos de las placas electrónicas. Hoy en día, se usa más en casos como ahora la programación, depuración y testeo de los puertos.



Fig. 27.- JTag (mod. Jet-C2000 de Signum) con el conector que la une a la placa de control.

3.4.4. Digital Signal Processor (DSP).

La DSP se encuentra conectada dentro de la tarjeta de control. Tal y como se explica anteriormente, la comunicación con el ordenador se realiza mediante el JTag (conectado al PC con puertos USB). De este elemento, la señal es conducida mediante circuitos integrados hacia la DSP (Digital Signal Processor). Este sistema está basado en un microprocesador (conectado a la tarjeta de control del convertidor) que posee un conjunto de instrucciones, un hardware y un software optimizados para aplicaciones que requieren operaciones numéricas a muy alta velocidad. Debido a esto es especialmente útil para el procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real: en un sistema que trabaje de esta forma se reciben muestras, normalmente provenientes de un convertidor analógico-digital (DAC).

En la figura siguiente se ilustra la conexión de los diferentes elementos que forman parte de la comunicación PC-Convertidor.

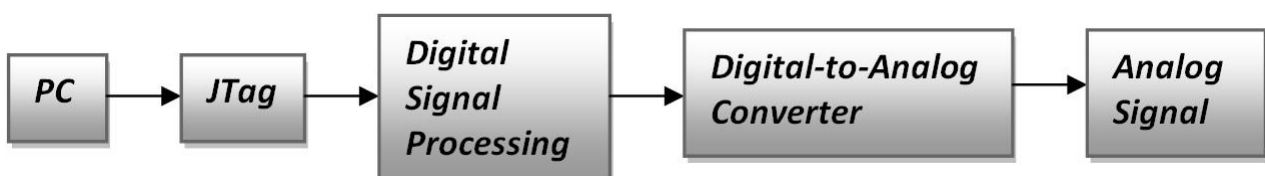


Fig. 28.- Esquema comunicación PC-Convertidor.

La DSP que lleva montada el convertidor del proyecto es una Texas Instrument TMS28335 Delfino, en coma flotante. El hecho que la arquitectura sea flotante en vez de fija dota a la DSP un mayor rango dinámico de almacenamiento, lo que permite evitar problemas de saturación.

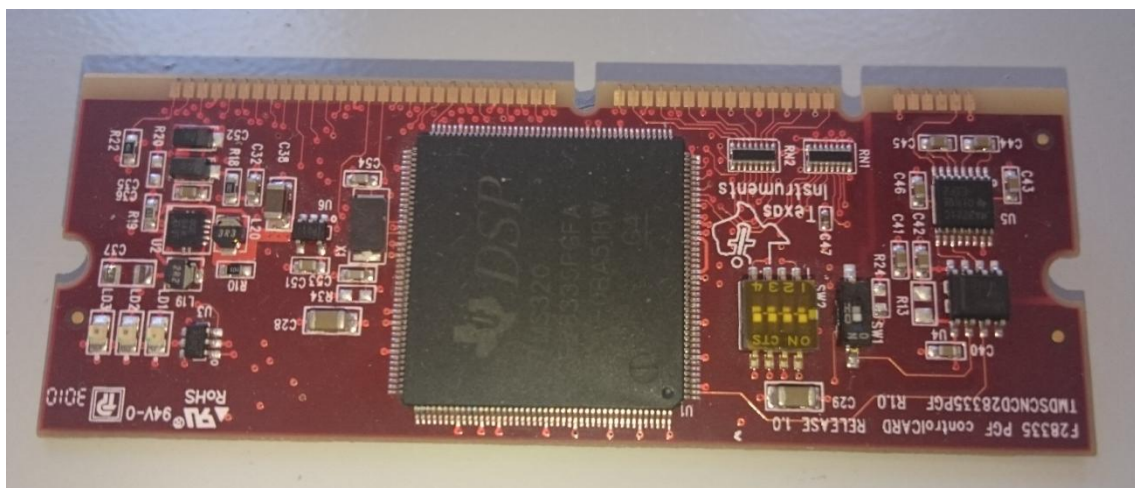


Fig. 29.- Tarjeta DSP (de Texas Instrument).

3.4.5. La conmutación (IGBTs).

Una vez el flujo de corriente continua pasa por las pletinas de cobre, es conducido hacia la conmutación. En el caso del convertidor estudiado, se utiliza un puente trifásico completo (*Three-Phase Full-Bridge IGBTs*).

En el apartado [0] se describen las diferentes estrategias de conmutación. Es por ello que volverlo a explicar sería redundante.

El tipo de conmutación que se utiliza en el montaje corresponde con el esquema de la Fig. 12, y su modus operandi se describe a continuación de la figura citada.

3.5. Filtrado de la señal (filtro LC).

Tras pasar por la etapa de la conmutación, la corriente obtenida se puede clasificar ya como corriente alterna, pero aún está lejos del resultado final, ya que en este punto se tiene una onda con muchas perturbaciones y ruidos de alta frecuencia (causados por la conmutación). Lo que implica que hay una generación de armónicos de alto grado que, en caso de no ser neutralizados, pueden llegar a dañar los diferentes elementos conectados a la red. Por otro lado, la generación

de dichos armónicos implica el incumplimiento con las normativas que regulan la calidad de la corriente inyectada a red.

Para reducir todas estas perturbaciones, y de este modo evitar dañar los equipos conectados, así como cumplir con las normativas vigentes (logrando una señal más próxima a la sinusoide ideal), los inversores incorporan un filtro a la salida. El filtro que incorpora el convertidor estudiado se trata de un LC.

A la siguiente figura se muestra la representación del filtro para una de las fases. Hay que tener en cuenta que el convertidor es trifásico y que por lo tanto el filtro de salida también lo será.

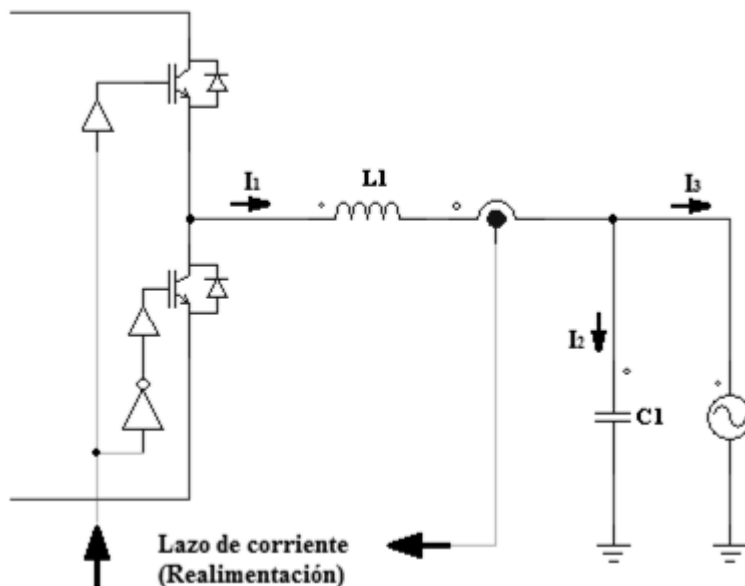


Fig. 30.- Esquema unifilar del Filtro LC.

Los valores de los elementos que contiene el filtro son:

Inductancia: $220 \mu H$, conexión estrella.

Condensador: $12 \mu F$, conexión estrella.

La función de transferencia del filtro, teniendo en cuenta que es un control por corriente, se obtiene a partir de la aplicación de la Ley de Ohm al circuito de la figura anterior (Fig. 30).

$$v_i - v_o = i \cdot Z = i \cdot (R + X_L)$$

Aislando la magnitud de control (es decir la corriente), se obtiene la ecuación de la función de transferencia del filtro:

$$i = (v_i - v_o) \cdot \frac{1}{R + Ls}$$

Por lo que la ecuación que finalmente resulta ser la correspondiente al bloque del filtro, queda de la siguiente forma:

$$\text{Filtro (s)} = \frac{1}{R + Ls}$$

La componente capacitiva del filtro no se tiene en cuenta debido a que la realimentación del lazo de control se realiza antes de llegar a los condensadores. Es por ello que la función matemática que modela el filtro LC, para este caso en concreto, acaba resultando ser de primer orden (s) en vez de segundo (s²).

La **Frecuencia de Corte (ω_c)** que presenta el filtro, dado que se trata de un Filtro LC, es la siguiente:

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{(220 \cdot 10^{-6}) \cdot (12 \cdot 10^{-6})}} = 19462,47 \text{ rad/s}$$

$$f_c = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{19462,47}{2\pi} = 3097,55 \text{ rad/s}$$

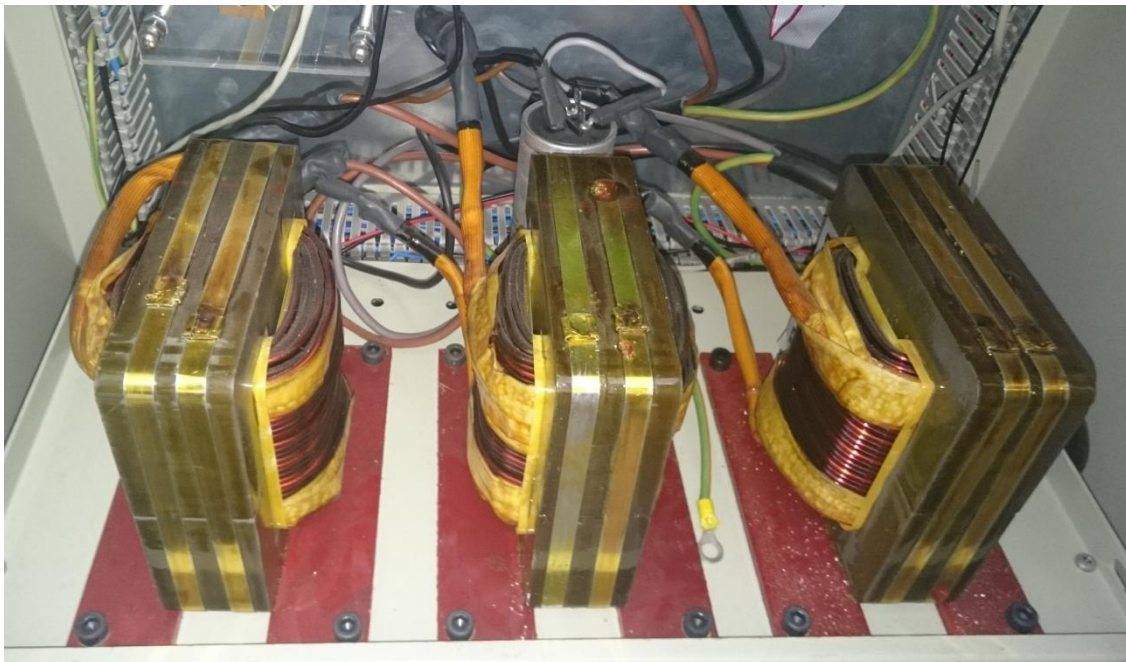


Fig. 31.- En primer plano de la imagen: Bobinas del filtro LC. Detrás de ellas se intuyen los Condensadores del mismo.

3.6. Transformador elevador (133-400 Vrms).

Una vez se ha pasado la etapa de la conmutación y del filtrado, sólo falta adaptar la señal a los valores normalizados, según la red a la que se inyecte. En el caso de Europa, la red trabaja a una tensión nominal de 400Volts, por lo que se deberá elevar la tensión hasta dicho valor mediante un transformador de potencia.

A nivel constructivo, se trata de un transformador de núcleo laminado y en seco. La configuración de conexionado es Dyn11, por lo que se aísla eléctricamente el neutro del convertidor con el neutro de la red. Es interesante que no haya continuidad entre los neutros de ambos devanados porque de ese modo se protege el convertidor de posibles componentes homopolares que puedan aparecer a la red, beneficiando el control sin afectar al funcionamiento normal del conjunto.

La relación de transformación del conjunto es de 133-400V_{RMS}. Sabiendo que la corriente máxima a la que trabaja el convertidor son 50A_{RMS} y que la potencia nominal del convertidor es de 10kW, se demuestra que el transformador está bien dimensionado ya que su potencia nominal es algo mayor a la del convertidor:

$$P_N = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N = \sqrt{3} \cdot 133 \cdot 50 \cong 11500W < 10000 W$$

PLACA DE CARACTERÍSTICAS	
Tipo	Trifásico
Frecuencia	50 Hz
Relación de Transformación	400/133,30 V
Conexión	Dyn11
Potencia Nominal	10kVA

Tabla 6.- Placa de características del transformador elevador.



Fig. 32.- Transformador elevador.

3.7. Protecciones.

Es importante poder garantizar la desconexión entre el convertidor y la red en caso de funcionamiento anómalo. La finalidad del sistema de protecciones es proteger a la instalación (evitando dañar los componentes que contiene), así como al personal humano.

A continuación se explican las protecciones que integra el convertidor, tanto para el lado de corriente continua, como para el de corriente alterna.

3.7.1. Lado DC.

El elemento de protección utilizado para el lado de continua del convertidor, es el **fusible**. Dicho elemento está dimensionado según los valores máximos de tensión y corriente a los que se trabaja en el bus de continua, más una cierta tolerancia. Es decir, debe soportar una tensión de 240 V más una cierta tolerancia, y una corriente de 50A más una cierta tolerancia.

Para este lado del convertidor, no se puede instalar ningún tipo de magnetotérmico ni diferencial (aún y ser dos elementos de protección básicos para cualquier instalación) debido a que su disparo depende de diferenciales de flujos de carácter pulsante (corriente alterna).

A continuación se muestra un esquema en el que se muestra la disposición de dicho fusible (bajo la nomenclatura *F1*):

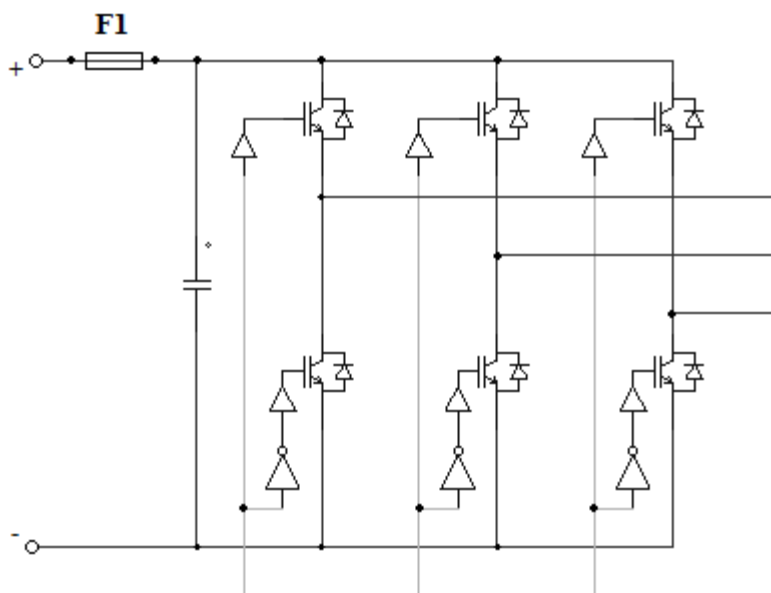


Fig. 33.- Detalle de la instalación de las protecciones lado DC (Fusible).

3.7.2. Lado AC.

Las protecciones que intervienen en el lado de corriente alterna del inversor son el diferencial (encargado de evitar derivas y diferentes fallas que pudieran haber en el circuito eléctrico) y el magnetotérmico (encargado de interrumpir la corriente en caso de sobrepasar unos ciertos límites).

- **Diferencial.**

Diferencial monofásico para cubrir los servicios generales. Protección contra posibles contactos y derivaciones de corriente. Trabaja a la tensión nominal de red (230 Vrms) y a la frecuencia normalizada a nivel europeo de 50Hz. Dimensionado para poder gestionar los 50Arms del convertidor.

- **Magnetotérmico.**

El convertidor dispone de diferentes interruptores magnetotérmicos, a continuación se detalla el motivo de cada uno de ellos.

Entre la red y el convertidor, se halla situado un interruptor magnetotérmico tripolar. Dado que se encuentra en el lado AT del transformador, la corriente máxima que circula es de: $50 \cdot (133/400) = 16,63 A_{RMS}$ y una tensión de $400V_{RMS}$, pulsando a la frecuencia natural de Europa, 50Hz.

A continuación se muestra una imagen en la que se aprecian las protecciones que incorpora el inversor.

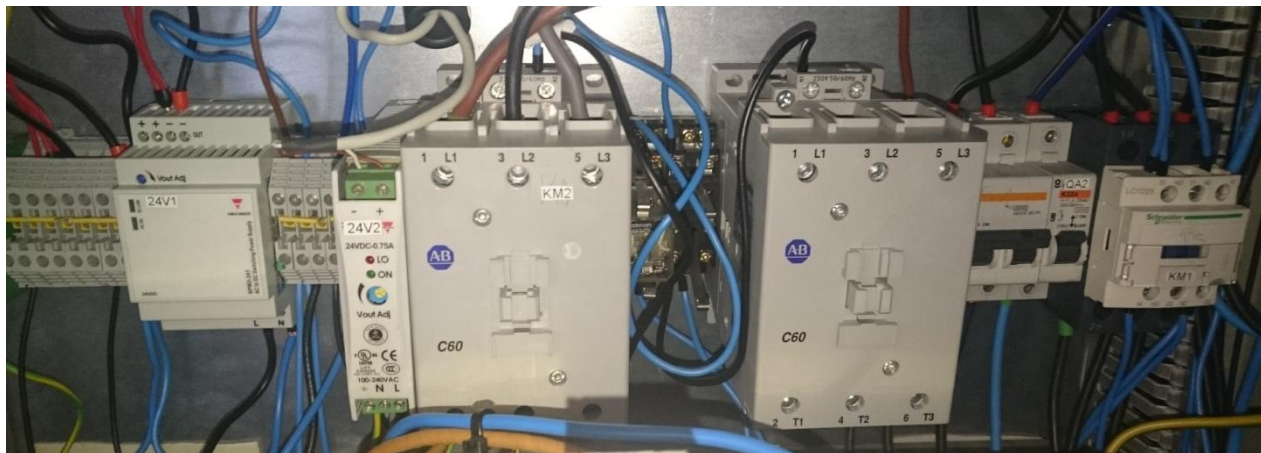


Fig. 34.- Sistema de Protecciones que integra el Convertidor.

3.8. Aparamenta de maniobra.

El equipo dispone de una serie de elementos dedicados a la apertura y cierre de diferentes circuitos eléctricos, lo que permite realizar maniobras como ahora la parada general del sistema, conexión o desconexión a la red, etc.

Todos ellos van alimentados, junto a la aparamenta de protecciones, control y elementos de medida, directamente a la red eléctrica mediante una conexión monofásica, es decir a 230V y 50Hz de frecuencia.

Cabe destacar que las fuentes de AC y DC a las que se encuentra el convertidor conectado también disponen de su aparamenta de maniobra, pero no se especificarán. De este modo, los elementos que componen la maniobra del convertidor son los siguientes:

- Conexión a la red AC:

Pulsador del tipo 'marcha-paro' (ON/OFF), que interrumpe la conexión entre el convertidor y la red de AC a la que se inyecta la potencia. No está dimensionado para actuar en caso de accidente o falla, sino que simplemente se emplea a modo de seguridad, es decir, para asegurar que hay continuidad o no, según se desee. Su accionamiento se realiza mediante la intervención del operario y dispone de un led que indica su estado (si hay continuidad o no la hay). A parte, se incorporan dos indicadores leds (uno verde y otro rojo) para informar en todo momento si el sistema está activado o desactivado, respectivamente.

- Habilitar / bloquear el inversor:

Se dispone de un interruptor de dos posiciones, que permitirá o no el funcionamiento del inversor según su posición (Enable/Disable). Siempre que se quiera usar el inversor, éste debe permanecer en la posición *Enable*. Si de lo contrario se ha finalizado su uso, el operario deberá permutar su posición a *Disable*.

- Paro de emergencia (interruptor tipo seta):

Elemento encargado de abrir el circuito en caso de falla o mal funcionamiento del sistema. Al ser un componente de maniobra, no está dimensionado para actuar en caso de cortocircuito o sobretensión (para ello ya se han instalado los elementos de protección magnetotérmicos), sino que su objetivo es evitar o limitar un eventual peligro en una determinada situación de emergencia.

A nivel constructivo, se trata de un interruptor NC (ofrece continuidad al circuito si no se ha activado) y su accionamiento, al igual que pasa con el contactor de conexión a red, es realizado mediante la intervención del operario.

A continuación se muestra una imagen en la que se puede apreciar la disposición de la aparamenta de maniobra que se ha incorporado en el inversor:



Fig. 35.- Botonera de Maniobra. Sistema de Marcha-Paro mediante los pulsadores verde (ON) y rojo (OFF). A su inferior se observan los leds que indican el estado del convertidor. Parada de Emergencia mediante el pulsador tipo seta (parte superior derecha de la imagen). Habilitar / Deshabilitar el inversor mediante el interruptor de dos posiciones (parte inferior derecha de la imagen).

CAPÍTULO
4.

Control del convertidor: Software.

A lo largo de este capítulo se describe el diseño del controlador del inversor estudiado, prestando especial atención en el cuerpo de la máquina de estados, ya que es aquí donde se centran las principales aportaciones. A parte, también se demostrarán los valores de diferentes parámetros del controlador mediante herramientas de cálculo como Matlab, así como los resultados obtenidos tras realizar simulaciones con dichos valores.

4.1. Diagrama de bloques esquema de control.

Uno de los requisitos con los que debe cumplir el convertidor de potencia es el de controlar la corriente que se inyecta a la red, de acuerdo con las normativas establecidas. Para ello, se deberán tener en cuenta aspectos como la reducción de la distorsión armónica, cancelación de la componente continua de la corriente inyectada (conocida también como componente homopolar), etc. Otro aspecto relevante es el control del factor de potencia, a partir del cual se modifica el tipo de potencia inyectada: Por un lado, la potencia activa, que es disipada en forma de calor o trabajo; por otro, la potencia reactiva, que es aquella potencia utilizada para la formación de los campos eléctrico y magnético.

A continuación se muestra el esquema completo del convertidor (tanto de la etapa de control como de la de potencia).

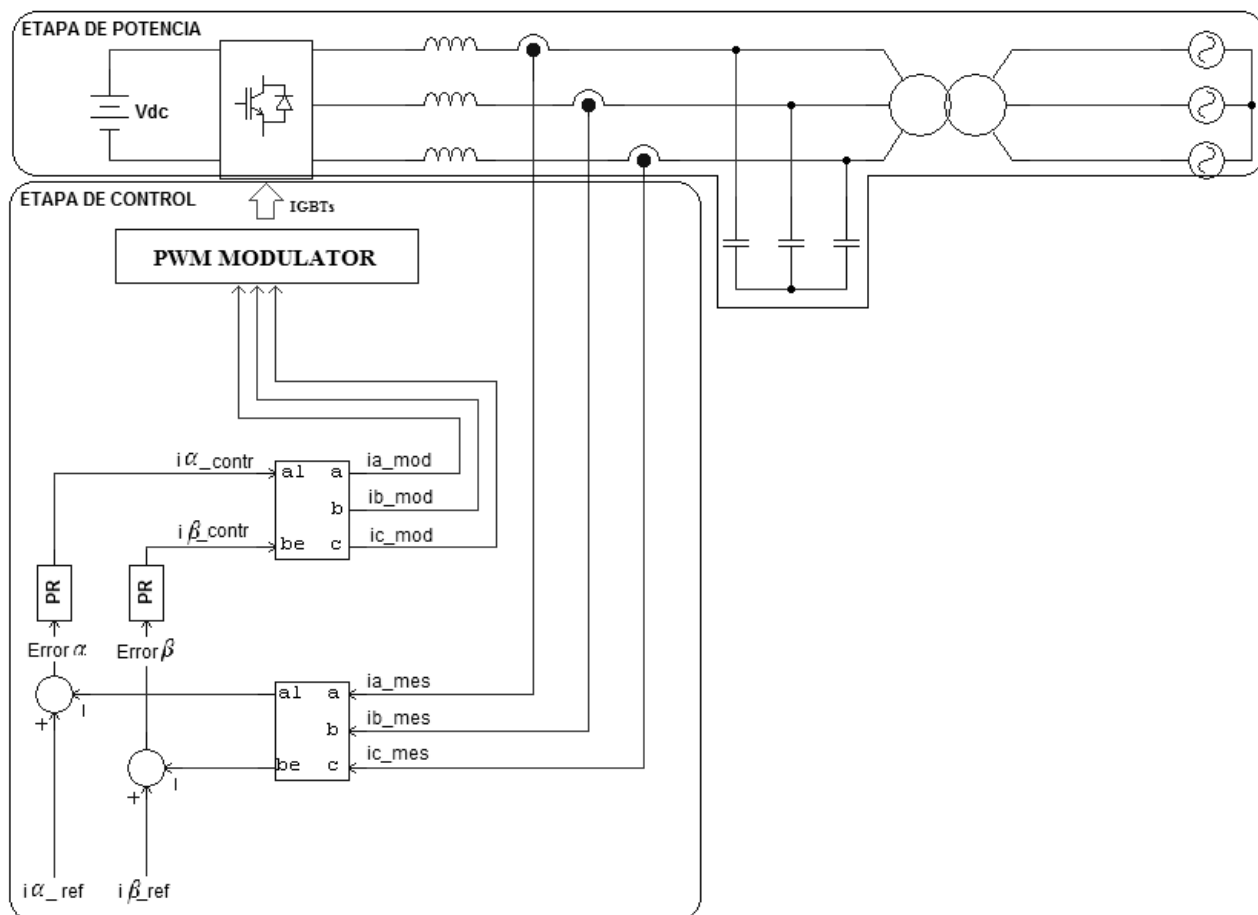


Fig. 36.- Diagrama de bloques de las etapas de Control y Potencia del convertidor.

Como se observa en la figura anterior (Fig. 36), la etapa de control del sistema del convertidor planteado, consta de los siguientes bloques:

- **Transformada directa de Clarke:** Para la generación de componentes $\alpha\beta$ sobre la corriente de línea medida a la salida del convertidor. Mediante esta transformada, las señales variables en el tiempo y bajo el sistema de referencia trifásico abc , pasan a un estado estacionario y un sistema de referencia de dos fases, $\alpha\beta$.
- **Regulador PR:** Elemento que permitirá alcanzar un nuevo estado de régimen permanente admisible ante cualquier posible perturbación y de la manera más rápida posible.
- **Transformada inversa de Clarke:** Una vez realizado el control de la señal del lazo de corriente bajo un sistema de referencia estacionario, con este elemento se recupera el sistema de referencia trifásico y variable en el tiempo (abc) para entrar en el bloque de modulación de PWM.

- **Modulación PWM:** Controla la energía que proviene de las señales periódicas obtenidas a partir de la transformada inversa de *Clarke* (es decir, i_{a_mod} , i_{b_mod} e i_{c_mod}) que serán transmitidas finalmente a la red de corriente alterna.

A continuación se exponen en detalle cada uno de los bloques que componen la etapa del control del convertidor estudiado.

4.2. Transformada de Clarke ($abc - \alpha\beta$).

Aunque la señal inyectada a red es de naturalidad trifásica y variable con el tiempo, su control se realiza a partir de un sistema de referencia bifásico y estático, para poder actuar mejor sobre la señal leída, obteniendo la respuesta deseada. Para ello se realiza la transformada de *Clarke*.

A continuación se explica en qué consiste y su fundamento matemático.

4.2.1. Concepto.

La estrategia matemática que se sigue para realizar la conversión de un sistema a otro, pasa por una matriz de giro cuya composición se deduce del siguiente diagrama vectorial:

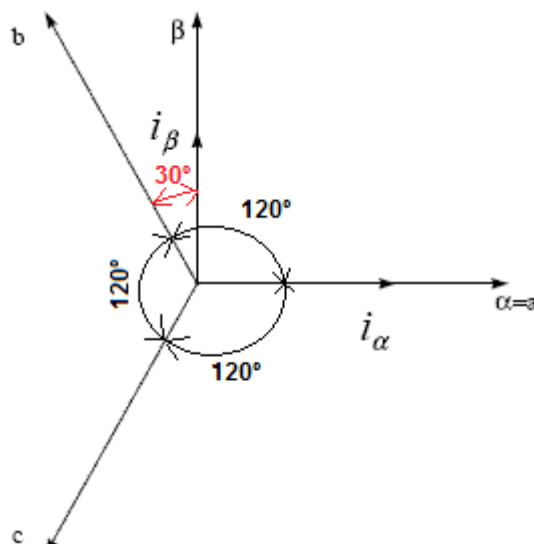


Fig. 37.- Diagrama vectorial ejes $abc-\alpha\beta$.

De donde se deduce que:

$$i_\alpha = i_a - \sin 30 \cdot i_b - \sin 30 \cdot i_c = i_a - \frac{1}{2} \cdot i_b - \frac{1}{2} \cdot i_c$$

$$i_\beta = i_b \cdot \cos 30 - i_c \cdot \cos 30 = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot i_c$$

Que expresándolo matricialmente queda como:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = k \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

Para determinar el valor de la constante k , dado que la potencia debe mantenerse invariable sea cual sea la referencia de ejes que se utilice, se procede a igualar potencias:

$$P_i = R_i \cdot i_i^2$$

$$P_\alpha + P_\beta = P_a + P_b + P_c$$

$$R \cdot i_\alpha^2 + R \cdot i_\beta^2 = R \cdot i_a^2 + R \cdot i_b^2 + R \cdot i_c^2$$

$$i_\alpha^2 + i_\beta^2 = i_a^2 + i_b^2 + i_c^2$$

$$2 \cdot (i_{\alpha\beta})^2 = 3 \cdot (i_{abc})^2 \rightarrow i_{\alpha\beta} = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) \cdot i_{abc}$$

Tal y como se demuestra en el cálculo anterior, la referencia de corriente bajo el sistema de referencia $\alpha\beta$, resulta ser $\sqrt{\frac{3}{2}}$ veces mayor que el valor bajo la referencia abc . Por lo que, para operar con las variables transformadas conservando la potencia constante entre los dos sistemas, se debe multiplicar la matriz de giro por la constante $k = \sqrt{\frac{2}{3}}$, obteniendo el siguiente sistema matricial:

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

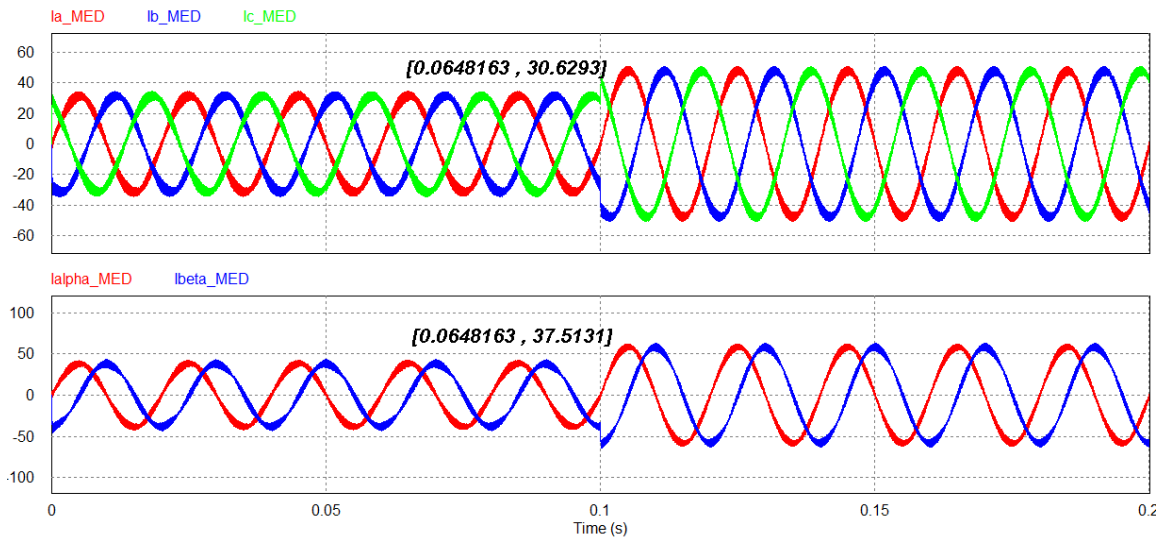


Fig. 38.- Intensidades (lado AC) antes y después de pasar por el giro de Clarke.
GRÁFICO SUPERIOR: Corriente en referencia abc , representada en color rojo para Ia , azul para Ib y verde para Ic . **GRÁFICO INFERIOR:** Corriente en referencia $\alpha\beta$, representada en color rojo para Ia y en azul para $I\beta$.

En la Fig. 38, se puede observar la intensidad antes y después de pasar por la matriz de giro (transformada de *Clarke*), en los gráficos superior e inferior respectivamente. En él se puede observar cómo se cumple la conservación de potencia de un lado al otro, incrementándose el valor de la corriente para el sistema de referencia $\alpha\beta$ en $\sqrt{3/2}$ respecto al abc .

Para demostrarlo se muestra una lectura para el mismo instante de tiempo determinado (no corresponde con ningún máximo de la onda) dónde, para la referencia trifásica (abc) se tiene un valor de 30,6293 A y para el sistema de referencia estacionario ($\alpha\beta$) se tiene un valor de 37,5131 A. En los siguientes cálculos se demuestra:

$$i_{\alpha\beta} = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) \cdot i_{abc} \rightarrow i_{\alpha\beta} = \left(\sqrt{\frac{3}{2}} \right) \cdot 30,6293 \rightarrow i_{\alpha\beta} = 37,5131 \text{ A}$$

4.2.2. Pros/Contras respecto al sistema de ejes síncronos.

A continuación se analizarán las principales ventajas/desventajas del sistema utilizado ($\alpha\beta$) respecto del sistema de ejes síncronos (dq) con el fin de argumentar por qué se utiliza un sistema y no el otro.

Tanto la matriz de giro utilizada para el cambio de ejes de referencia (*Clarke*, para sistema $\alpha\beta$) como la de *Park*, para el sistema dq , se basan en una conversión del sistema trifásico a bifásico.

La principal diferencia entre uno y otro es que en el giro de *Clarke*, se obtiene un sistema de referencia ESTACIONARIO, mientras que con la de *Park*, se obtiene un sistema igualmente bifásico pero con referencia ROTATORIA, girando ambos ejes a la velocidad angular cuyo periodo corresponde con el de la frecuencia de pulsación de la señal trifásica.

4.3. Controlador Proporcional Resonante: PR.

En el apartado [2.2.2] se realiza una breve presentación de los dos posibles controladores que podría aceptar el convertidor, donde se explica, a nivel teórico, su fundamento matemático y su principio de funcionamiento.

De las dos ecuaciones presentadas para el controlador PR, que son:

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \cdot \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (\text{caso ideal})$$

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \cdot \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (\text{caso real})$$

Se ha acabado implementando, en el circuito de PSIM, los bloques que corresponden con la ecuación que describe el caso real. El esquema del circuito equivalente para dicha operación es el de la Fig. 19.

A continuación se presentan los principales puntos fuertes y flojos del controlador escogido para el lazo de corriente del convertidor, PR, respecto al PI.

4.3.1. Pros/Contras respecto al Proporcional Integral (PI).

Para el control de corriente del convertidor, se está trabajando con unas señales de consigna y lectura del tipo sinusoidales, pulsando a una cierta frecuencia. Es por ello que el error existente entre la consigna (señal de entrada) y la lectura (señal de salida), no será un valor fijo, sino que tendrá una determinada frecuencia. El hecho que sea sinusoidal y que tenga una determinada frecuencia, implica que el error a lo largo de un período tampoco será constante, siendo mayor en los máximos/mínimos de la función y menor cuando ésta pase por cero.

Este error es provocado a partir de la dinámica de la componente integral del bloque. Aún y así existen convertidores que integran el controlador PI en su

control, en vez del PR. Ello se debe a la incorporación de una etapa denominada **Feedforward**. Esta etapa consta de tomar una referencia de la tensión de red, neutralizando el error estacionario que no es capaz de neutralizar el propio controlador PI, y llegando de este modo a un estado estable más rápidamente.

A continuación (Fig. 39) se muestra el diagrama de bloques del controlador en caso de ser un PI (con la necesidad de añadir la etapa del *feedforward*).

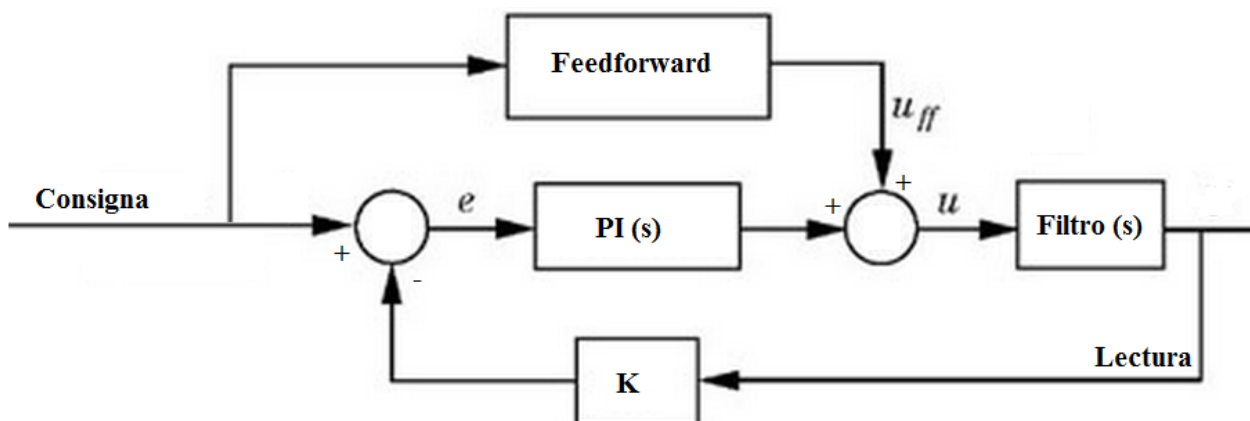


Fig. 39.- Diagrama de control en caso de montar un Proporcional Integral. Necesidad de añadir la etapa *Feedforward*.

Por contrapartida, el controlador Proporcional Resonante (PR), resulta ser más apropiado para este tipo de aplicaciones (control de corriente para convertidores de potencia) ya que proporciona una ganancia a una cierta frecuencia, conocida como frecuencia de resonancia. Ello evita los problemas de error estacionario anteriormente mencionados a causa de la componente integral del PI, lo que implica que la eliminación de la etapa del *feedforward*, resultando ser un sistema menos complejo.

A continuación se muestra el diagrama de bloques del controlador del convertidor en el caso de montar un control PR:

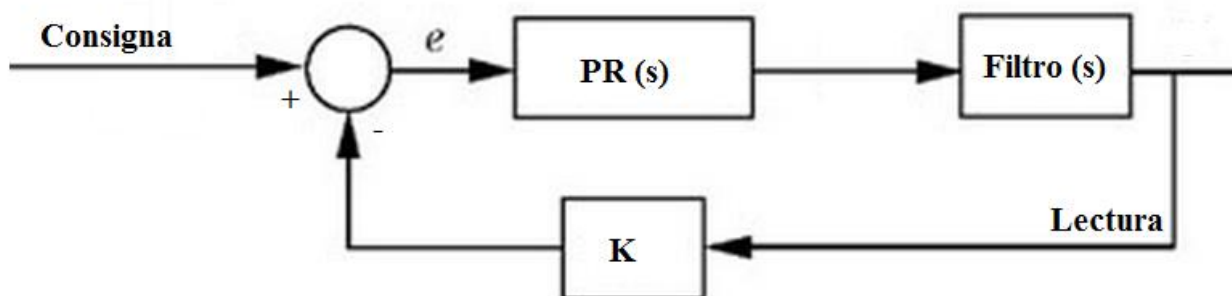


Fig. 40.- Diagrama de control con el Proporcional Resonante. Dada la naturaleza de la parte Resonante, no hay la necesidad de añadir ninguna etapa tipo *Feedforward*.

La gran diferencia en este segundo bloque (controlador PR) respecto del anterior (controlador PI + *feedforward*) es que con la componente resonante ya se está teniendo en cuenta la naturalidad de la consigna (señal sinusoidal), ajustando su valor según la frecuencia de resonancia.

4.4. Control del sistema en lazo cerrado: Justificación de los parámetros.

Tal y como se demuestra en el punto anterior, el controlador que resulta más apropiado para la aplicación que se está estudiando es el Proporcional Resonante.

A continuación se realiza el estudio de estabilidad del mismo sobre el lazo de corriente.

Para ello, es necesario tener presente el diagrama de bloques del lazo que se pretende realimentar, así como las ecuaciones (en el dominio de *Laplace*) que describen cada uno de los elementos que intervienen. A continuación se muestra el diagrama de bloques (esquema típico de un sistema de control en lazo cerrado), así como las ecuaciones que modelan el comportamiento matemático de cada uno de ellos.

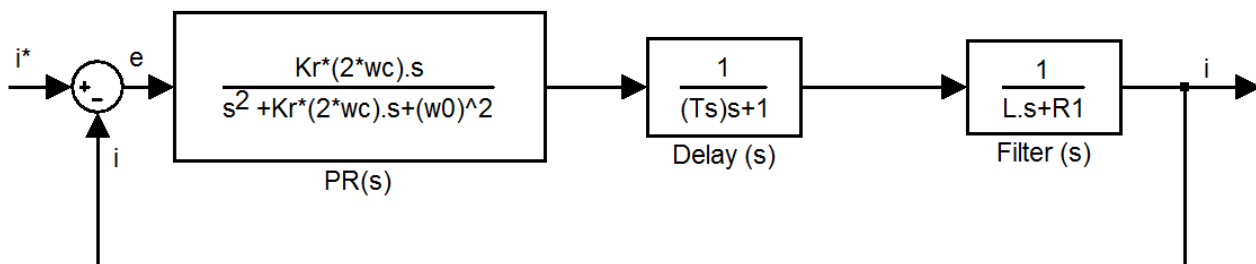


Fig. 41.- Esquema de control con las ecuaciones que modelan el comportamiento de cada elemento.

Una vez se tiene claro el planteamiento, así como las ecuaciones, se debe pasar del esquema al código, generando un archivo del tipo “.m” de Matlab. Para ello se deberán realizar los siguientes pasos:

- Declaración de los parámetros:

En este primer punto, se deben declarar los valores de los elementos que componen los bloques del diagrama, tales como resistencias, inductancias, frecuencias, etc. Estos son los valores reales de los componentes del convertidor que se dispone en el laboratorio.


```

%PARAMETROS:
R1=0.01
L=220E-6
w0=(1.4125*pi)
wc=(100*pi)
fs=10E3
Ts=(1/fs)

```

Fig. 42.- Matlab Code (i): Declaración de los diferentes parámetros.

PARÁMETRO	JUSTIFICACIÓN
R1, L y f_s	Valores tomados del convertidor
ω_0	Ancho de banda alrededor de la frecuencia AC de ω_0 $3dB = 20 \cdot \log(f_0) \rightarrow f_0 = 10^{\frac{3}{20}} = 1,4125 \text{ Hz} \rightarrow \omega_0 = 1,4125\pi \text{ rad/s}$
ω_c	Frecuencia de resonancia del convertidor $f_c = 2 \cdot 50\pi = 100\pi \text{ rad/s}$

Tabla 7.- Justificación parámetros Matlab

- **Declaración de las variables:**

A continuación se declaran aquellas constantes de las que se pretende hallar su valor (variables). Que para el controlador diseñado son dos:

k_p Parte proporcional del controlador.

k_r Parte resonante del controlador.

El valor de la constante proporcional (k_p) del controlador se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$k_p = \frac{\omega_c \cdot L}{V_{dc}} = \frac{100\pi \cdot 220 \cdot 10^{-6}}{240} \rightarrow k_p = 2,88 \cdot 10^{-4}$$

El valor de la constante resonante (k_r) del controlador se ha determinado a partir de ejecutar el código e ir ajustando su valor con los resultados obtenidos con la herramienta *Siso Tool*. Finalmente, el valor de la constante resonante es de:

$$k_r = 17$$

- **Declaración de las ecuaciones: En dominio continuo (Laplace).**

Una vez se han declarado todos los parámetros y variables que intervienen, se procede a declarar las ecuaciones que modelan los bloques del control:

```
%DELAY DEL FILTRO
GDs=(1)/(1+s*Ts)

%FILTRO AC
GFs=((1)/(L*s+R1))

%PR NON SIMPLIFIED TRANSFER FUNCTION
GPRs=(kp+((kr*2*wc*s)/((s^2)+kr*2*wc*s+(w0^2))))
```

Fig. 43.- Matlab Code (ii): Declaración de las ecuaciones de cada elemento.

- **Declaración del lazo abierto del sistema:**

Con todos los bloques que intervienen declarados en el dominio de Laplace, se procede a la declaración del lazo abierto del esquema de control. Para ello, se debe realizar la asociación en serie de los tres elementos que se han declarado anteriormente, es decir:

```
%OL DE TODO EL SISTEMA
GOLs=(GFs*GDs*GPRs)
```

Fig. 44.- Matlab Code (iii): Declaración del lazo abierto del sistema.

- **Ejecución de la herramienta *Siso Tool* sobre dicho lazo:**

Con la declaración del lazo abierto de control, ya se está en disposición de la ejecución de la herramienta de cálculo *Siso Tool* con el fin de analizar si el sistema es estable o no, y cuantificar cómo de estable resulta ser (a partir de la información sobre las Ganancias de Fase y Margen que ofrece la herramienta).

```
% sisotool(GOLs)
sisotool(GFs*GDs,GPRs)
```

Fig. 45.- Matlab Code (iv): Ejecución de la herramienta *Siso Tool*.

Una vez ejecutado el código, aparece la siguiente pantalla:

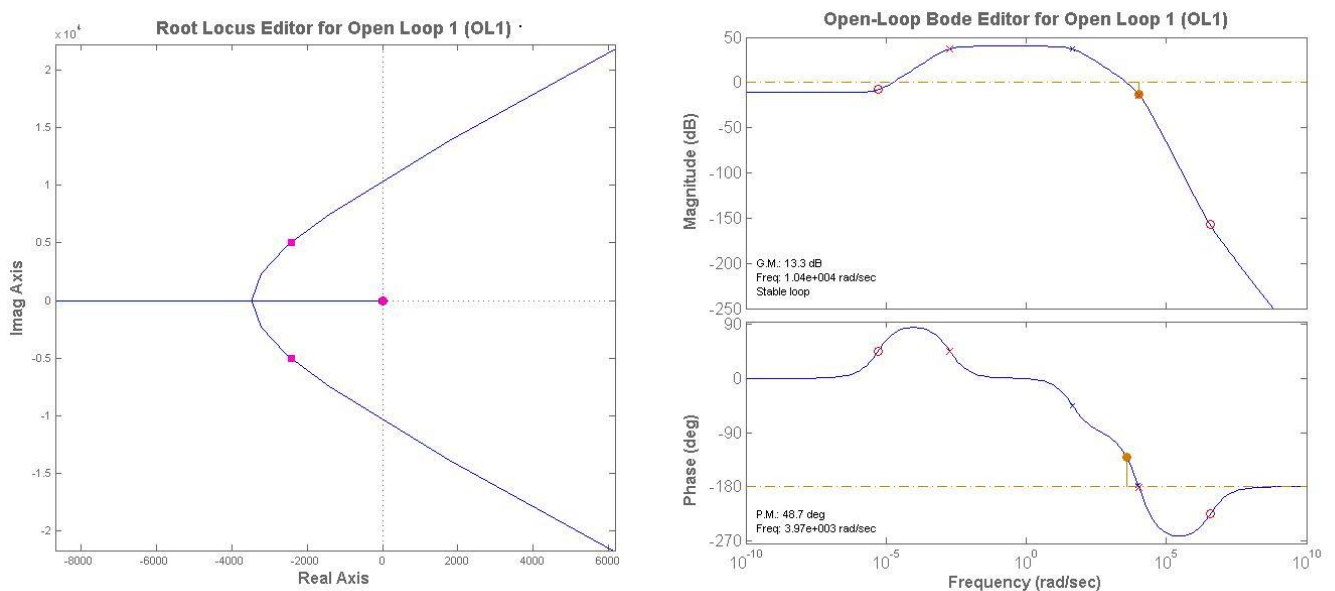


Fig. 46.- *Siso Tool*. GRÁFICO IZQ: Mapa de la localización de las raíces. GRÁFICO DER: Diagrama de Bode del lazo abierto (Ganancia en el superior y Fase en el inferior).

De la cual se puede extraer la siguiente información:

- Gráfico de la izquierda: Localización de las raíces del lazo abierto de nuestro sistema. En él se ubican los ceros que anulan la función de transferencia.
- Gráfico de la derecha: En el diagrama superior se muestra la Ganancia (*Gain Margin*) del lazo abierto del sistema (en dB), así como su estabilidad (estable / inestable). El gráfico ofrece información sobre la cantidad de ganancia que está por encima de los 0dB cuando el gráfico de la Fase corta el eje de los -180° . Como se puede observar, la lectura de la Ganancia, en el punto donde se superan los -

180° para la Fase, es de 13,30 dB, valor más que aceptable de cara a garantizar la estabilidad del sistema.

Por otro lado, en el inferior, se indica su Margen de Fase (*Phase Margin*), en grados. En él se puede leer información sobre la estabilidad relativa del sistema. A la frecuencia de corte (ω_c), el retraso de fase introducido por la función de transferencia en lazo abierto debe ser inferior a 180° para que el sistema en lazo cerrado sea estable. El margen de fase nos cuantifica la estabilidad del sistema; es decir, cuántos grados por encima del límite, 180°, se encuentra el sistema para la frecuencia de corte. Como se puede observar, la lectura del Margen de Fase, en el punto donde se anula el gráfico de la Ganancia, es de 48,70°, lo que significa que se está trabajando con un margen de casi 50° por encima del punto de inestabilidad. Cabe destacar que no es un margen muy amplio, pero al mismo tiempo es un valor suficientemente aceptable.

- Diagrama de bode sobre el lazo cerrado del sistema:

Una de las herramientas que ofrece *Siso Tool* es la de realizar el análisis del Diagrama de Bode sobre el lazo cerrado del sistema anteriormente declarado.

Con esta representación se caracteriza la respuesta en frecuencia del sistema una vez ya hecha la realimentación. En él se diferencian dos gráficos: En el superior, que representa la Magnitud, se observa el módulo de la función de transferencia en función de la frecuencia del sistema. En el inferior, que representa la Fase, se observa la fase de la función de transferencia en función de la frecuencia, y permite analizar el desplazamiento en fase de una señal a la salida del sistema respecto a la entrada para una frecuencia determinada.

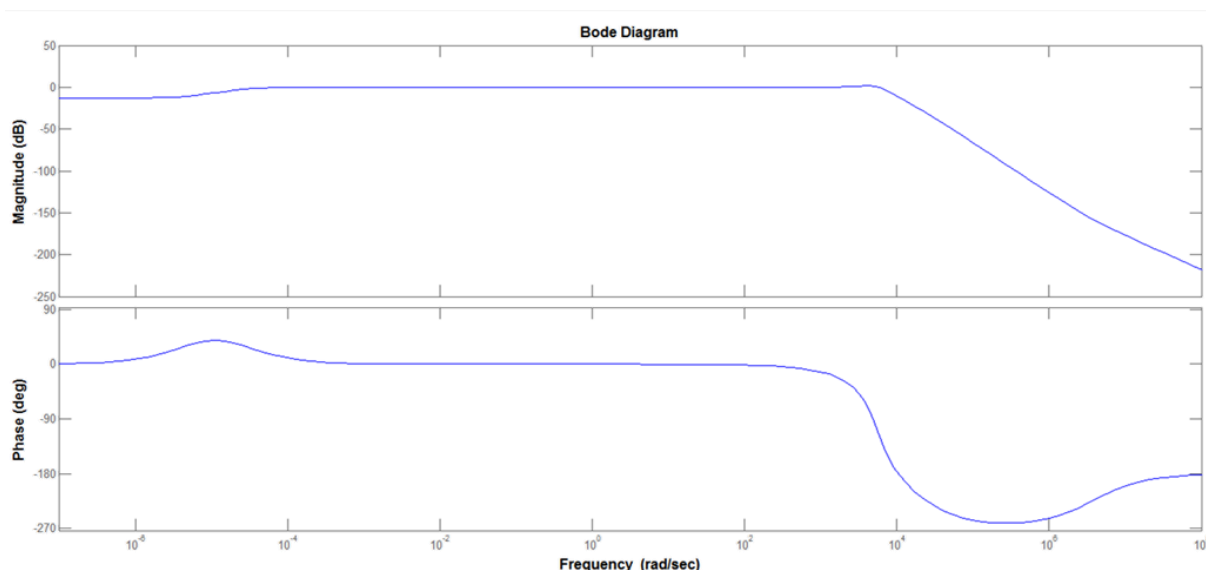


Fig. 47.- Bode Plot for Closed Loop system.

4.4.1. Simulaciones y resultados obtenidos.

Hasta ahora lo que se muestra es la herramienta que se ha utilizado para realizar los cálculos (Matlab), así como los resultados obtenidos (presentados a modo de representaciones gráficas).

El siguiente paso es aplicar los resultados obtenidos a un programa de simulación eléctrica, para obtener las señales deseadas en cada etapa del convertidor. A continuación se muestran las simulaciones obtenidas mediante el programa PSIM, para los valores del controlador (K_p y K_r) obtenidos con el Matlab.

El sistema funciona con consignas de corriente. Para evaluar su comportamiento se aplica, a dichas consignas un salto de un 50%, pasando de una referencia inicial de 40A a una referencia, después del escalón, de 60A.

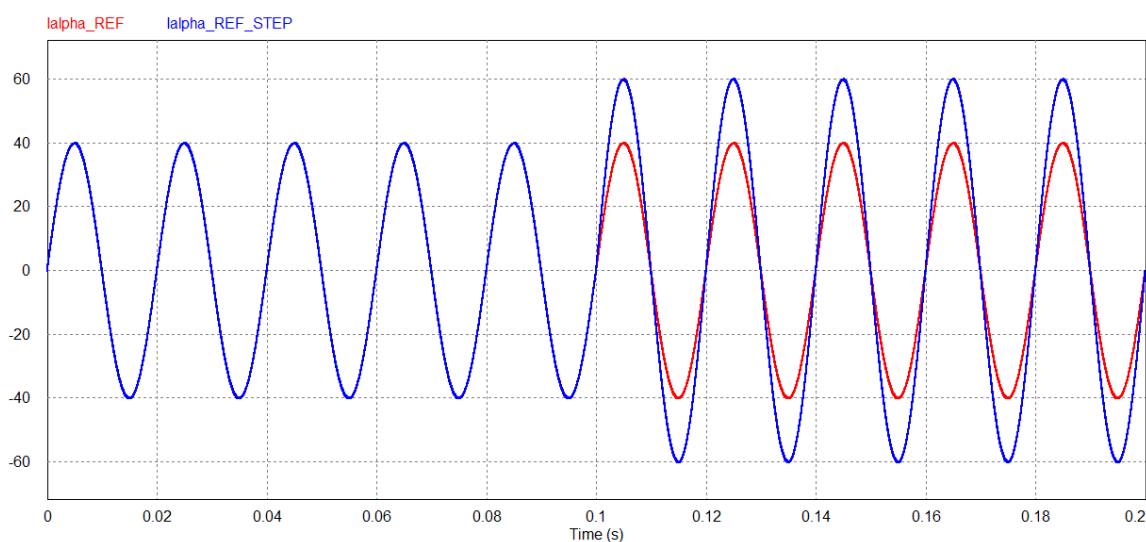


Fig. 48.- Consigna de corriente antes y después del escalón.

Una vez se ha generado la señal de referencia (consigna), ésta se compara con la respuesta real del sistema (lectura), obteniendo a la salida de esta comparación el error que hay entre ambas señales:

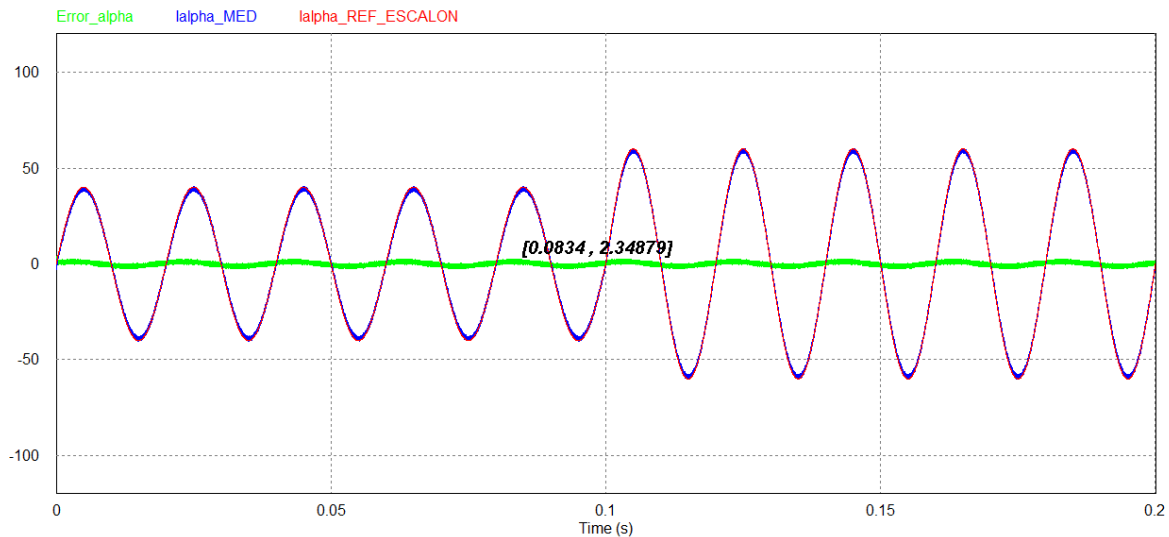


Fig. 49.- Onda de corriente medida (color azul) en comparación con la corriente de referencia (color rojo). Se observa cómo van superpuestas y a penas se distingue la diferencia. En color verde se observa el error (obtenido a partir de la diferencia entre las otras dos señales).

Como se observa en el gráfico anterior (Fig. 49), la señal medida sigue a la perfección la consigna. La única diferencia que hay entre ambas ondas es la que provoca la etapa de la conmutación, ofreciendo una señal a la salida con ruido (perturbaciones de alta frecuencia). Es por ello que el error acumulado tiene un valor de pico de $2,35\hat{A}$, lo que implica un valor eficaz de $1,66\text{Arms}$.

Este error es lo que interesa eliminar, por lo que es la señal que entra al controlador PR. Cabe recordar que se está trabajando en una referencia $\alpha\beta$, por lo que, una vez superada la etapa del control, se realiza la Transformada Inversa de *Clarke* para volver a la referencia trifásica (*abc*). La señal a la salida de esta transformada inversa es la que conducirá la conmutación de los IGBTs, a partir de la comparación con la señal triangular (que es la que impone la frecuencia de conmutación del chopeo).

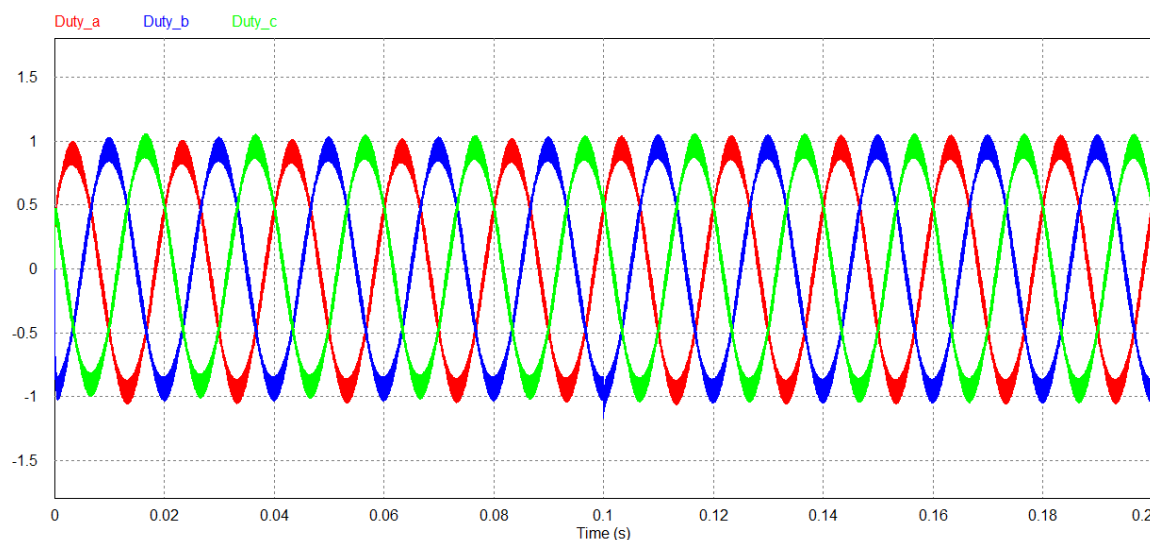


Fig. 50.- Señal antes de entrar en la etapa de la conmutación, conocida como *Duty*. Color rojo, *Duty* de la fase 'a'. Color azul, *Duty* de la fase 'b'. Color verde, *Duty* de la fase 'c'.

En la figura anterior se observa la señal justo antes de entrar en la etapa de la conmutación. Tal y como se puede verificar, se trata de una onda sinusoidal trifásica, con máximos/mínimos en $\pm 1V$.

Una vez realizada la etapa de conmutación se obtiene la intensidad inyectada a la red (que al mismo tiempo es la leída, para cerrar de nuevo el lazo de control):

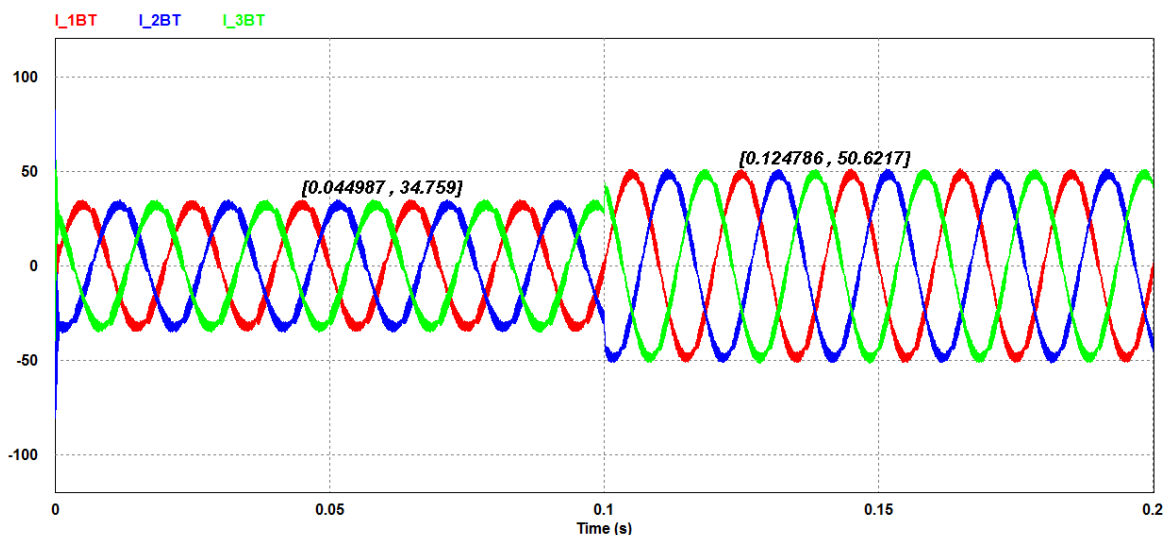


Fig. 51.- Ondas de corriente a la salida del convertidor antes y después del escalón (aplicado en $t=0,10\text{seg}$). Se observa el correcto funcionamiento del controlador ya que la señal se estabiliza de inmediato

En este último gráfico se observa la onda de la corriente inyectada a red. Se demuestra también el correcto funcionamiento del control, dado que se sigue perfectamente el cambio de consigna, en el que se pasa de inyectar 34,76 A a 50,62 A.

Se puede verificar que, este salto corresponde con el que anteriormente se presenta, ya que:

$$50,62 - 34,76 = 15,86 \text{ A}$$

El salto anteriormente presentado (bajo referencias $\alpha\beta$) resulta ser de 20 A. Si se realiza la conversión hacia el sistema de referencia trifásico, se observa que estos 20 A se corresponden con los 15,86 obtenidos:

$$i_{abc} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \cdot i_{\alpha\beta} \rightarrow i_{abc} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \right) \cdot 20 \rightarrow i_{\alpha\beta} = 16,33 \text{ A}$$

Valor que se aproxima a los 15,86 A obtenidos a la simulación. La pequeña diferencia entre un valor y otro es debida al error que hay entre consigna y lectura.

Por otro lado, este salto de corriente implica, en cuanto a la potencia inyectada, un salto de aproximadamente 2,50 kW. A continuación se demuestra:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{3} = 133 \cdot \left(\frac{34,76}{\sqrt{2}} \right) \cdot \sqrt{3} \rightarrow P_1 = 5662,10 \text{ W}$$

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \sqrt{3} = 133 \cdot \left(\frac{50,62}{\sqrt{2}} \right) \cdot \sqrt{3} \rightarrow P_2 = 8245,55 \text{ W}$$

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 8245,55 - 5662,10 = \mathbf{2583,45 \text{ W}}$$

4.5. Proyecto en código C#.

Otro punto clave del control del convertidor es el proyecto programado en lenguaje C#. El proyecto consta de una serie de archivos de código en los que se declaran las variables que intervienen, se ejecutan las diferentes acciones del convertidor, etc.

Uno de los archivos que compone el proyecto es el denominado '*Controllers.c*'. En él se declaran las estructuras y valores de los diferentes controladores, así como la Máquina de Estados. Es precisamente este último punto la parte del código que se ha analizado y modificado en el actual Proyecto:

4.5.1. Máquina de Estados: Concepto.

Para poner en marcha y manipular el convertidor, es necesario comprender la lógica programada que se sigue. Es decir, saber qué se obtendrá a la salida a partir de una determinada entrada; saber en qué estado se encuentra el inversor; saber hasta qué límites se puede llegar antes que salte cualquier alarma, etc.

Para llegar a comprender todo ello, se tiene que entender la **Máquina de Estados**, que consta de una estructura programada a partir de la cual se determina el comportamiento del convertidor en base al estado en el que se encuentre.

- **Estructura.**

Para el caso de este convertidor, se han declarado un total de 8 estados, enumerados del 0 al 7. Con el objetivo de saber siempre en qué estado se encuentra el convertidor, en la tarjeta de control se integra un display 7 segmentos.

A continuación se presentan los diferentes estados que puede tener el convertidor según las entradas:

- **Estado 0: IDLE.** Éste es el estado en el que el convertidor se encuentra inicialmente (inactivo, del inglés). En este estado, los valores de las diferentes variables de salida del convertidor son los siguientes:

control_status Desactivado (CS = 0).

trip_IGBT La conmutación se encuentra desactivada.

p_referenece = 0 Se asegura que la inyección de potencia esté desactivada.

- **Estado 1: GRID OFF.** Una vez el operario activa el sistema (*General_Enable==1*), y siempre en caso de no tener ninguna alarma, se pasa al siguiente estado (Estado nº1). Este estado tiene la función de mantener el sistema activo y se accederá a él siempre que el nivel de la tensión de red sea menor a la mínima requerida.

NOTA: No confundir sistema activo con inyectar potencia. En este nivel aún no se habla de inyección de potencia.

- **Estado 2: GRID ON.** Este estado se activa sólo cuando, viniendo del estado nº1 (GRID_OFF), se supera el nivel mínimo requerido de tensión de la red de corriente alterna. Cuando el convertidor se encuentra en este estado, significa que a nivel de la red de corriente alterna, el sistema ya está listo para iniciar la etapa de conmutación. No obstante, falta verificar que el nivel de la tensión en el bus de continua también es el correcto para iniciar dicha etapa.

- **Estado 3: RECTIFIER MODE.** Cuando hay una cierta tensión en el bus de continua, pero ésta no es suficiente como para inyectar potencia a red, el estado en el que se encuentra el convertidor es éste (indicándolo con un nº 3 en el 7 segmentos). Para este estado los IGBTs aún están todos abiertos y el control desactivado, pero, en caso de estar activados, el convertidor funcionaría como rectificador en vez de cómo inversor, ya que el nivel de tensión en el lado de alterna es aún mayor que en el de continua, provocando que el flujo de potencia sea del lado AC al DC.

- **Estado 4: INVERTER MODE.** Este estado se activa cuando se cumple que las tensiones de red (lado AC) y del bus de continua (lado DC), son mayores al valor mínimo requerido para iniciar la etapa de conmutación y con ella, la inyección de potencia. A parte, dado que éste es el momento en el que se inicia la

circulación de corriente, se debe verificar desde fuera (mediante la intervención del operario) que efectivamente se desea inyectar potencia (introduciendo un '1' en la variable binaria *enable_inverter_operation*). En este estado, los valores de las diferentes variables, son:

control_status Activado (CS = 1).

untrip_IGBT La conmutación se encuentra activada.

$p_{referencia} = A \cdot V_{dc} + B$ Inyección de potencia según algoritmo de MPPT.

- **Estado 5: STAND BY MODE.** A este estado se llega a partir del anterior, cuando la tensión en el bus de continua llega a rebajar un cierto límite. En el momento que se activa este modo (el nº 5), se desactiva la conmutación, así como el Control_Status, hasta que la tensión en bornes del condensador de continua vuelve a estar por encima del mínimo establecido, que se vuelven a activar los dos ítems anteriores y se reanuda la inyección de potencia.
- **Estado 6: SECURE STOP.** Como se indica en el nombre, este estado es el de parada de emergencia. Estando en cualquier de los anteriores, si salta alguna alarma o el sistema está inactivo (*General_Enable!=1*), se pasa inmediatamente a este estado, desactivando el control del sistema, así como abriendo todos los IGBTs.
- **Estado 7: FAULT.** Finalmente se declara un estado de Falta, en el que se deshabilita todo tipo de control. También se fuerza la inactividad de los transistores IGBTs (abriéndolos).

Una vez analizado el comportamiento de la Máquina de Estados a partir de una breve explicación de lo que hace cada uno de los diferentes estados y cómo se llega a ellos, a continuación se ilustra mediante un esquema conocido como Diagrama de Estados:

- Esquema.

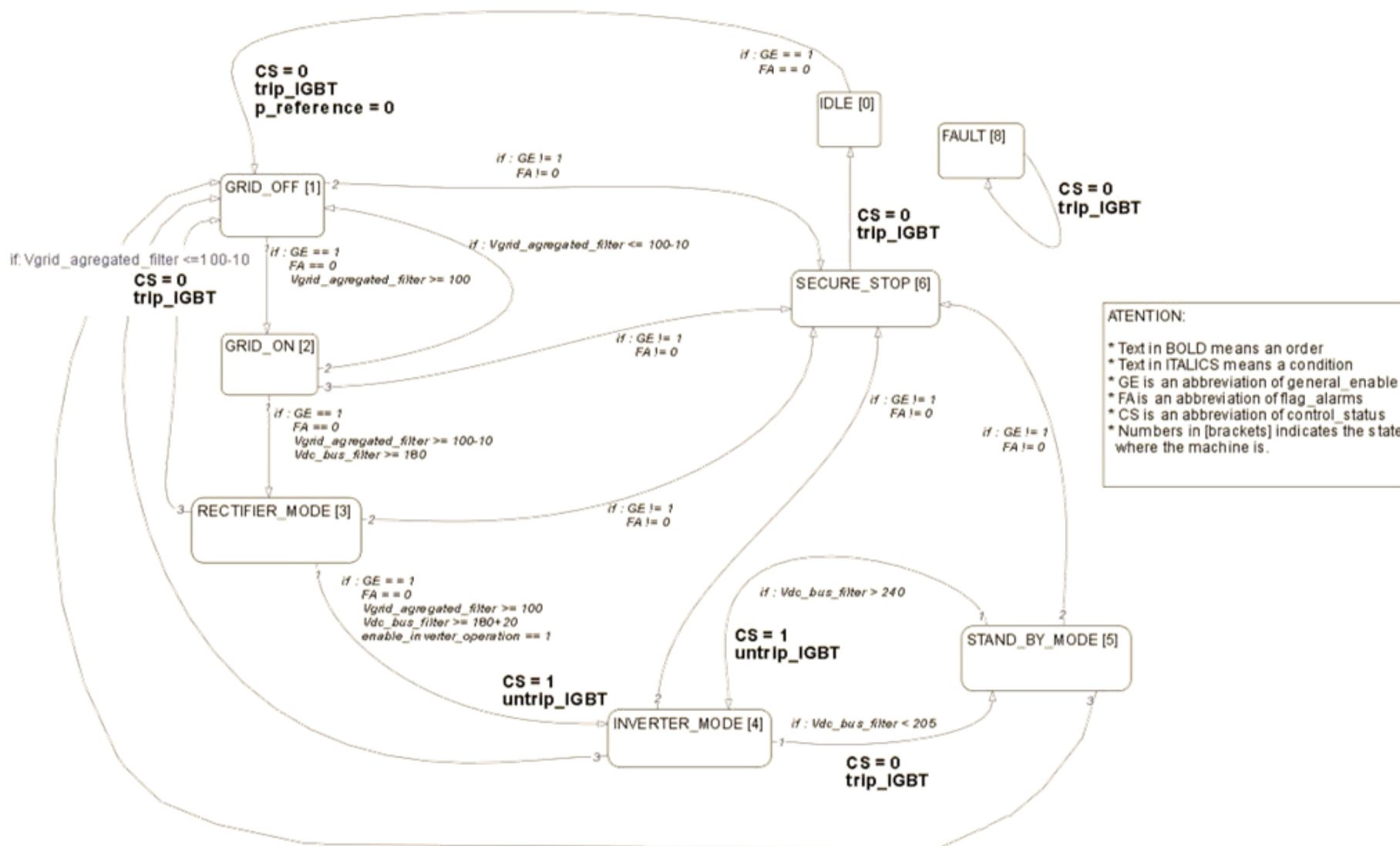


Fig. 52.- Diagrama de Estados

Como se observa, en el Diagrama de Estados se representa la lógica que sigue el programa a partir de líneas que unen diferentes cajetines. Las líneas representan las transiciones que hay entre estados, y en ellas se indican las condiciones que se tienen que cumplir para seguir una transición u otra.

También se indica (destacado en negrita) en qué momento se está activando y desactivando el control, ya que es de extrema importancia para el operario saber cuándo se activará o no la inyección de potencia a red.

Finalmente, hay los cajetines, que indican los posibles estados en los que la máquina se puede encontrar, indicando entre corchetes el número correspondiente a cada uno de ellos.

4.5.2. Otras variaciones realizadas:

A parte de acabar de pulir la máquina de estados, añadiendo transiciones que no había anteriormente y contemplando casos que en el código inicial se obviaban, también se han añadido dos modificaciones que a continuación se detallan:

- **Algoritmo del MPPT.**

Uno de los aspectos que hacía falta mejorar era el control de la inyección de potencia, aplicando una estrategia que regule la potencia inyectada a la red en función de la potencia generada por la turbina. Como se trata de un experimento realizado sin la turbina, ésta potencia pasa a ser el nivel de la tensión existente en bornes del bus de continua.

Teniendo en cuenta los niveles mínimos y máximos de la tensión en el bus de continua y que la potencia máxima que el convertidor puede inyectar es de 10kW, es necesario crear una ecuación que controle la inyección de máxima potencia. En ella, se demuestra el correcto funcionamiento del Seguimiento del Punto de Máxima Potencia (MPPT, del inglés, *Maximum Power Point Tracking*):

$$P_{reference} = 100 \cdot V_{dc} - 20000$$

Como se puede ver, el seguimiento de máxima potencia depende directamente del nivel de tensión en bornes del bus de continua. A su vez, cuando se inicia la etapa de inyección de potencia, hay una cierta caída de tensión en el bus, lo que provoca un pequeño transitorio inicial.

A nivel experimental, cuando se pasaba del estado nº 3 (RECTIFIER_MODE) al nº 4 (INVERTER_MODE), para la tensión nominal en el bus (240 Vdc), se iniciaba la etapa de inyección de potencia con un salto de 0 a 4000 W, lo que provocaba una caída de tensión tan grande que se llegaba a rebajar el límite inferior de la tensión en el bus de continua, pasando directamente al estado nº 5 (STAND_BY_MODE).

Para corregir este problema, se ha añadido al código un algoritmo que fuerce un inicio más suave (en forma de rampa), lo que nos conduce al siguiente punto.

- **Rampa inicial cuando se inyecta potencia.**

Tal y como se explica en el final del punto anterior, resulta necesario aplicar algún sistema que provoque un inicio de inyección de potencia más suave. En este caso se ha optado por definir una variable nueva ('*k_escala*') cuyo valor mínimo es 0,10 y su valor máximo la unidad (es decir 1). A continuación se explica la solución aplicada:

- La idea es multiplicar toda la ecuación del MPPT por una constante que pase de su valor mínimo a la unidad en un determinado tiempo. De este modo, se fracciona la inyección de potencia hasta que la constante se neutraliza (el 1 es el elemento neutro de un producto, puesto que todo número multiplicado por la unidad da el mismo número).
- Su incremento va relacionado a la frecuencia con la que se realiza una lectura del código C#. Se debe establecer cuánto tiempo se desea que dure dicha rampa. En este caso se ha establecido un tiempo total de 2 segundos:

$$\Delta T = T_f - T_0 = 2 - 0 = 2\text{seg}$$

$$T_s = 200\text{mseg} = 0,20\text{seg}$$

$$\frac{\Delta T}{T_s} = \frac{2}{0,20} = 10$$

- En 2 segundos, se realiza un total de 10 lecturas del código. A continuación, sabiendo el valor mínimo y máximo de la variable '*k_escala*', se procede a calcular cuánto se debe incrementar dicha constante en cada lectura del código para alcanzar su valor máximo en el intervalo deseado (2 segundos):

$$\Delta k_{escala} = \frac{k_{escalaMAX} - k_{escalaMIN}}{n^{\circ} \text{ lecturas}} = \frac{1 - 0,10}{10} \rightarrow \Delta k_{escala} = 0,09$$

- Una vez calculados los valores, se puede aplicar la rampa inicial al algoritmo del MPPT:

$$P_{reference} = K_{escala} \cdot (100 \cdot V_{dc} - 20000)$$

A continuación se muestra el efecto producido por dicha rampa en el momento que se inicia la etapa de inyección de potencia, para el nivel nominal de tensión en el Bus DC (240 V). En el gráfico, se representa la variación de potencia en función del tiempo para ambos sistemas de arranque:

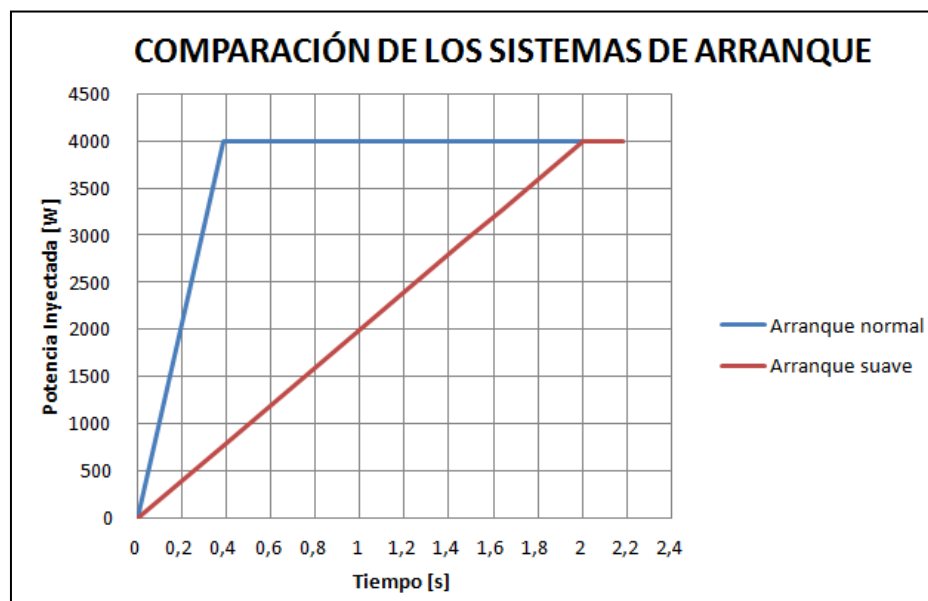


Fig. 53.- Variación de potencia en función del tiempo según sistema de arranque (Normal, color azul y Con la Rampa, color rojo).

Del gráfico se deduce que:

- En el primer sistema de arranque, se pasa de 0 a 4kW en menos de medio segundo (0,40seg), creciendo a razón de 1kW/0,10seg variación demasiado radical. Del otro modo, se alcanzan los 4kW tras 2seg, creciendo a razón de 1kW/0,50seg variación más aceptable.
- Aún y tardar más tiempo en alcanzar la consigna (2seg versus 0,40seg) se evita la caída de tensión tan pronunciada que sufre el bus de continua. Con ello se evita también el transitorio inicial (ya que la potencia va en función de dicha tensión), así como un posible cambio de estado a STAND_BY_MODE (en caso que la caída supere el valor establecido en la Máquina de Estados).

CAPÍTULO
5.

Caso Práctico: Ensayos Experimentales.

En este bloque se desarrollará la parte aplicada del proyecto. En los puntos anteriores se ha realizado, por un lado, un estudio teórico de los elementos que componen el inversor, y por otro lado, la simulación del sistema mediante PSIM y MATLAB, aplicando los valores reales de los diferentes elementos que componen el inversor.

Una vez hecha la simulación en tiempo continuo, el siguiente paso es discretizarla para poder sintonizar la DSP a partir de los valores obtenidos. Finalmente, una vez ya se ha sintonizado la DSP y se ha comprobado que la respuesta obtenida es la correcta, se pasa a trabajar con el convertidor de corriente.

Para el convertidor que se estudia en el actual proyecto, no ha sido necesario realizar la discretización y sincronización debido a que ya había estado funcionando anteriormente, con lo que se ha pasado directamente a testear el inversor, con el objetivo de corroborar su correcto funcionamiento, así como la aportación de una serie de mejoras.

A continuación, antes de iniciar con los diferentes ensayos, se muestra el montaje del setup completo del sistema, es decir, con todos los elementos conectados:



Fig. 54.- Imagen del setup completo del sistema (i). De izq. a der: Inversor (con un multímetro para la lectura de V_{dc}), Osciloscopio (mostrando la onda de la corriente inyectada a red), PC (donde se muestra la tabla dinámica y los dos gráficos que el operario puede elegir qué lectura ver), fuente AC (red). Falta mostrar la fuente DC.

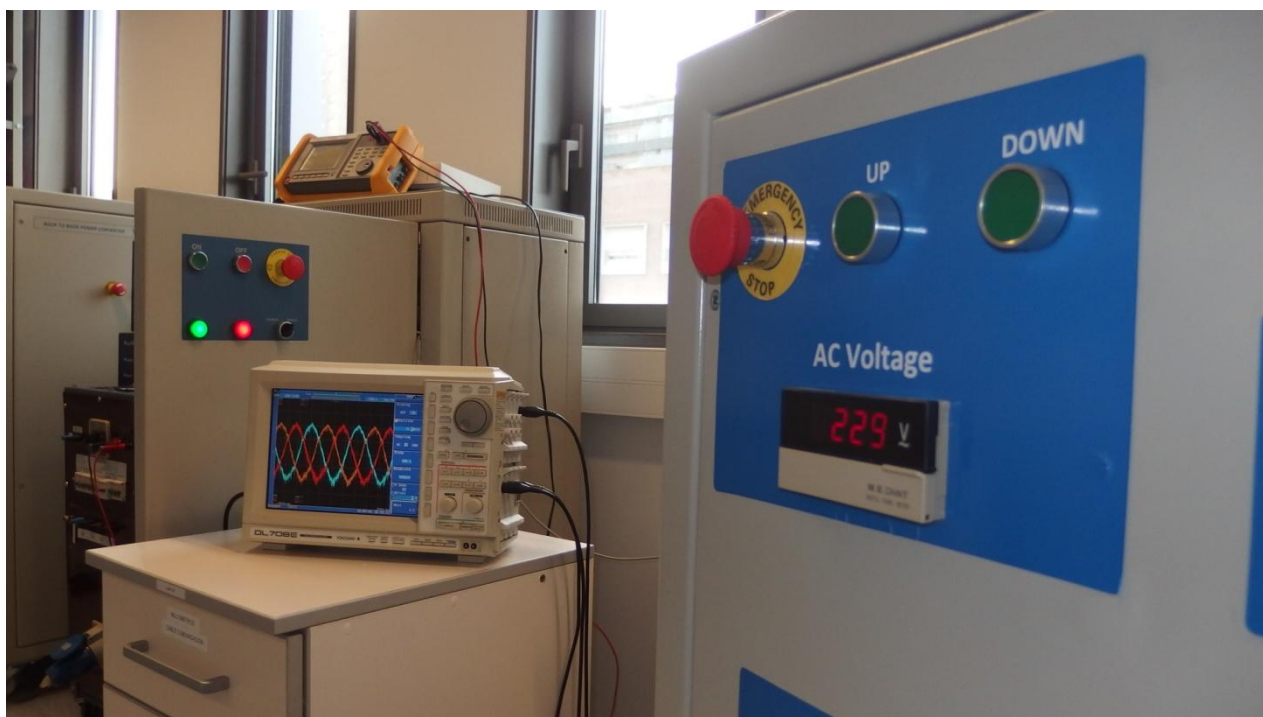


Fig. 55.- La ingeniería también es arte. Imagen del setup completo (ii); en primer plano se observa la lectura de la tensión a la red AC.

5.1. Ensayo preliminar. Comprobación secuencia de fases.

- **Objetivos**

En este primer ensayo se pretende comprobar que todo el *Setup* se encuentre bien montado y listo para realizar los diferentes tests.

Esta comprobación se debe realizar para asegurar una correcta secuencia de fases. En caso de tener una correlación de fases errónea, entre el inversor y la red, y llegar a inyectar potencia, dañaría los diferentes elementos del sistema.

Para ello se alimentará el convertidor, a la entrada, a través de una fuente de tensión regulable DC por el lado del condensador electrolítico. A la salida, se dispondrá de una fuente de tensión regulable AC encargada de simular la red a la que se pretende inyectar la potencia generada.

Como se explica anteriormente, la estrategia de control del lazo de corriente de este inversor es a través del sistema de ejes estacionarios (Alpha y Beta). Mediante los sensores que incorpora el propio inversor, se comprobará que la señal captada en las secuencias positivas y negativas de dichos ejes sean las correctas.

- **Material**

- Fuente de tensión regulable DC.
- Fuente de tensión regulable AC.
- Cableado de experimentación de seguridad.
- Inversor.
 - Protecciones.
 - Filtro LC.
 - Transformador elevador.
- JTag.
- Ordenador con el software Code Composer Studio.
- 2 voltímetros.

- **Esquema.**

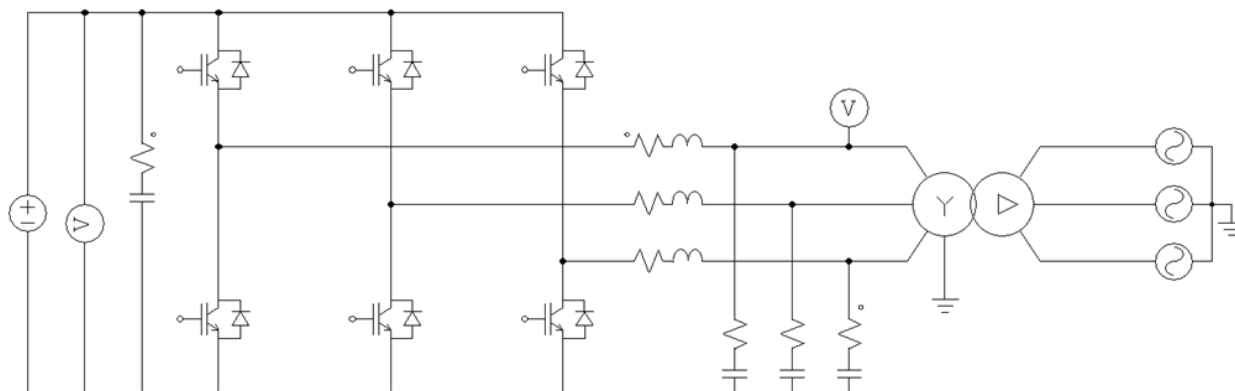


Fig. 56.- Esquema unifilar del montaje.

Dado que el objetivo es comprobar que todo funcione correctamente y asegurar que el orden de fases es el adecuado, para este ensayo los elementos de medida que se precisan son únicamente dos voltímetros (aparte de los sensores de comunicación inversor-PC ya integrados en el propio inversor): Uno para medir la tensión en el lado de corriente continua y otro para la lectura del potencial en el lado de corriente alterna.

- **Procedimiento.**

1. Encender el ordenador.
2. Abrir el proyecto en código C mediante el programa Code Composer Studio.
3. Conectar el Jtag (elemento básico para la comunicación PC-Inversor).
4. Alimentar el armario de control y los elementos de medida.
Los elementos de control tienen su propia alimentación (conexión a 230V y 50Hz).
5. Ejecutar el código del proyecto.
 - Compilar todo el código (verificando que no presenta ningún error).
 - Comunicación PC-Jtag: Reconocimiento de la tarjeta de comunicación. En este momento tendremos la conexión entre el ordenador y el inversor lista.
 - *Real Time Mode*: Se debe activar el modo en tiempo real para que la información de los diferentes parámetros (que se muestra en la tabla dinámica y los gráficos) se vaya actualizando constantemente.
 - *Run*: Una vez establecida la comunicación, seleccionamos la opción que ejecuta el código.

- *Continuous Refresh*: Hay que asegurarse que la opción que actualiza automáticamente la información esté conectada, para poder ver las variaciones tanto en la tabla dinámica como en los gráficos de que se disponen en el workspace de Code Composer.

A la siguiente figura (Fig. 57) se muestra una captura de pantalla en la que distingue la tabla dinámica (parte inferior de la imagen) y el búffer de los dos gráficos (parte superior de la imagen). En el caso de los gráficos, hay un total de 20 posibles visualizaciones (10 por pantalla).

Nota: La captura no muestra ningún valor debido a que se ha realizado con el sistema desconectado. En caso de haberse realizado con el sistema listo para funcionar, en la tabla dinámica se mostrarían los valores de los diferentes parámetros y en los gráficos se vería la forma de la señal representada.

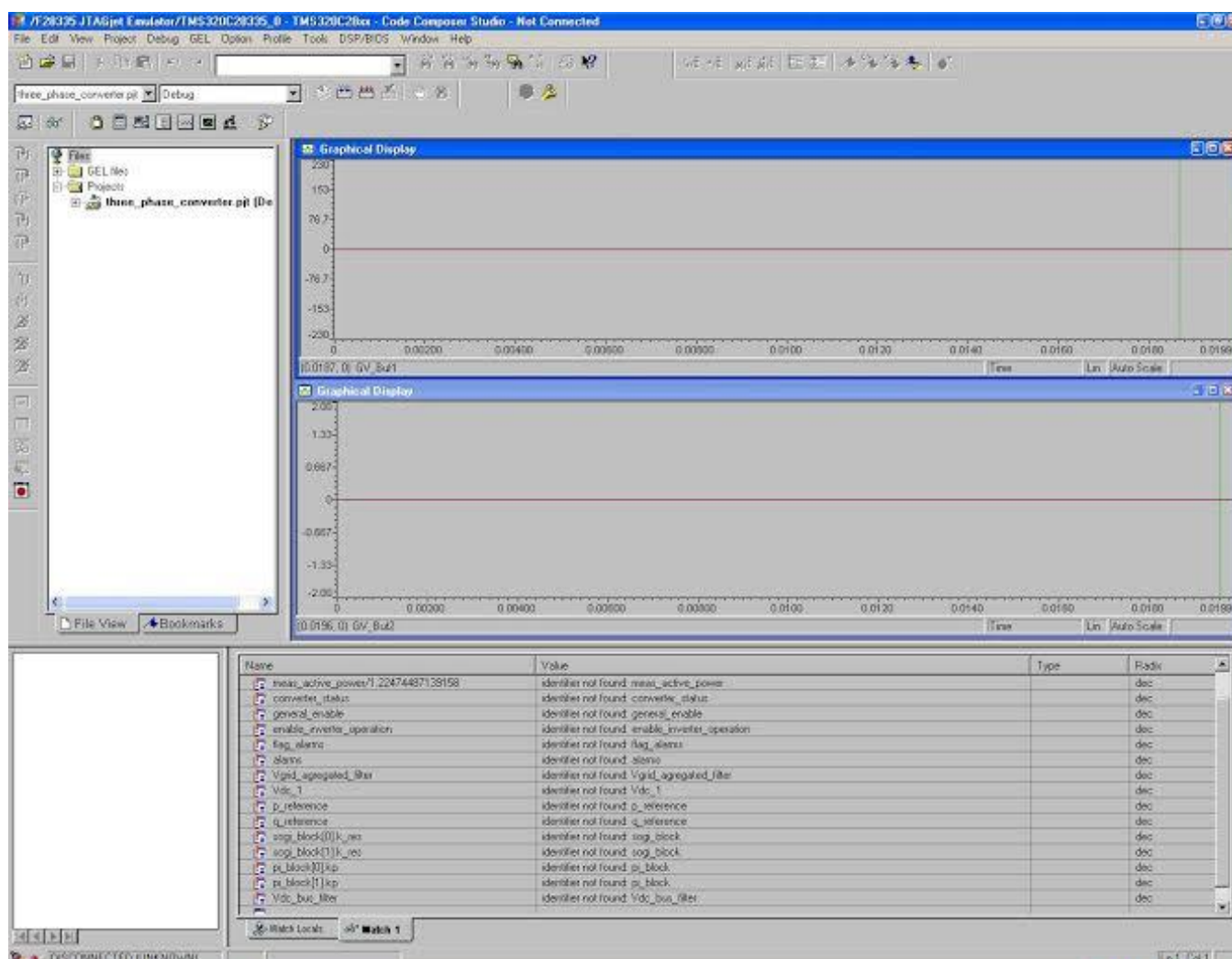


Fig. 57.- Workspace del Code Composer. Con el sistema ejecutado se muestran dos gráficos (según opción escogida por el operario) en las dos ventanas superiores. Debajo, se observa la tabla de animación sobre la cual el operario puede activar/desactivar diferentes partes del convertidor. En ella también se muestran las lecturas obtenidas (valor numérico).

6. Activar la fuente de tensión del lado de corriente continua.
 - Asegurarse que la polaridad es la correcta.
 - Activar el contactor general de la fuente de tensión.
 - Activar el magneto-térmico.
 - Aumentar hasta la tensión de 240 Vdc.
7. Activar la fuente de tensión del lado de corriente alterna.
 - Asegurarse que el contactor que hay entre la red y el inversor está abierto (led rojo activado).
 - Activar el contactor general de la fuente de tensión.
 - Activar el magneto-térmico.
 - Aumentar hasta obtener una tensión de 30Volts en el lado BT del inversor.
8. Accionar el contactor de red del inversor (cambio del color del led de rojo a verde).

En este momento ya se puede determinar si la secuencia de fases es la correcta o no lo es, a partir de la visualización de los gráficos mostrados por Code Composer. Para ello, se deben seleccionar los gráficos en los que se muestra las secuencias positivas y negativas de alfa y beta, que son los siguientes:

α positiva	Visualización '0' , gráfico 1
β positiva	Visualización '1' , gráfico 1
α negativa	Visualización '5' , gráfico 1
β negativa	Visualización '6' , gráfico 1

Una vez realizado el experimento, se procede a la desconexión de los elementos.

9. Accionar el contactor que abre el circuito entre la red y el inversor (cambio del color del led de verde a rojo).
10. Desactivar la fuente de tensión del lado de corriente alterna.
11. Desactivar la fuente de tensión del lado de corriente continua.
 ATENCIÓN: La descarga del bus de continua no es instantánea debido al condensador electrolítico de 2200uF.
12. Quitar la alimentación del armario de control del inversor.
13. Detener el programa Code Composer.
14. Apagar el ordenador.

- **Resultados y conclusiones.**

Una vez realizado el montaje, se ha podido observar que la secuencia de fases es la correcta ya que las ondas graficadas en los búferes positivos tanto de alfa como de beta son dos señales sinusoidales.

Por otro lado, se puede afirmar también que la secuencia de fases es la correcta a través de la visualización de los gráficos negativos de alfa y beta. En este segundo caso, se observan dos señales sin ningún tipo de periodicidad y de magnitud insignificante (del orden de 10^{-4} V).

En caso de haber tenido una secuencia de fases errónea, los gráficos serían los mismos, pero opuestos. Es decir, para las secuencias positivas de alfa y beta se habrían obtenido señales de un orden de magnitud insignificante, mientras que para las secuencias negativas de los mismos ejes se habrían obtenido las señales sinusoidales.

5.2. Test del lazo de corriente.

- **Objetivos**

Partiendo de la base que todos los elementos están correctamente conectados, se puede proceder a la conmutación de los IGBTs, lo que provocará una inyección de corriente a red.

Una vez se esté conmutando, se introducirá en la tabla dinámica anteriormente presentada el valor de la potencia a inyectar. Lo que se pretende en este ensayo es demostrar que, efectivamente, la potencia inyectada es la que el usuario ha introducido. Para ello se realizará una captura de la corriente inyectada y la tensión en una de las fases del convertidor:

- **Material**

El listado del material necesario para llevar a cabo este ensayo, es el mismo que el anterior, añadiendo los siguientes elementos:

- 3 sondas de corriente.
- 1 sonda de tensión.
- Osciloscopio.

- **Esquema.**

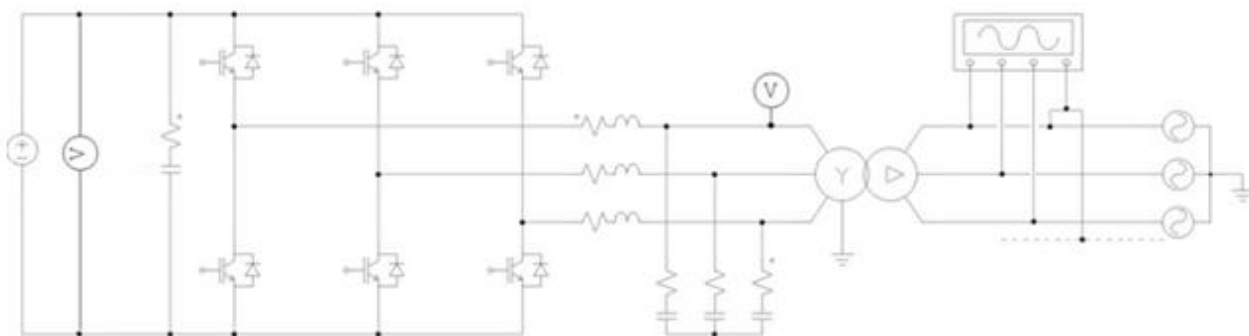


Fig. 58.- Esquema unifilar del montaje para el test del lazo de corriente.

Tanto a nivel de material como de esquema de montaje, no difiere mucho del ensayo que se explica en el punto anterior. En este caso, puesto que se pretende inyectar corriente a red, se ha incorporado un osciloscopio con el que se visualizará la forma de la onda trifásica de la corriente inyectada a red (conectando una sonda de intensidad en cada una de las tres fases), así como la tensión en bornes de una fase (sonda de tensión entre fase y neutro).

- **Procedimiento.**

1. Encender el ordenador.
2. Abrir el proyecto en código C mediante el programa Code Composer Studio.
3. Conectar el Jtag (elemento básico para la comunicación PC-Inversor).
4. Alimentar el armario de control y los elementos de medida.
Los elementos de control tienen su propia alimentación (conexión a 230V y 50Hz).
5. Ejecutar el código del proyecto.
6. Activar la fuente de tensión del lado de corriente continua.
 - Asegurarse que la polaridad es la correcta.
 - Activar el contactor general de la fuente de tensión.
 - Activar el magneto-térmico.
 - Aumentar hasta la tensión de 240 Vdc.
7. Activar la fuente de tensión del lado de corriente alterna.
 - Asegurarse que el contactor que hay entre la red y el inversor está abierto (led rojo activado).
 - Activar el contactor general de la fuente de tensión.
 - Activar el magneto-térmico.
 - Aumentar hasta obtener una tensión de 100Volts en el lado BT del inversor.

8. Accionar el contactor de red del inversor (cambio del color del led de rojo a verde).

En este instante, el inversor se encuentra preparado para inyectar potencia a red, a falta que el usuario lo indique mediante la variación de una de las entradas de la tabla dinámica (cambiar de '0' a '1' el parámetro '*enable_inverter_operation*').

9. Habilitar, mediante la tabla dinámica, la inyección de potencia a red.

Se inicia la conmutación de los IGBTs, y la consecuente transformación de la corriente continua a corriente alterna.

10. Introducir la consigna de potencia que se pretende inyectar.

El usuario debe introducir en el parámetro '*p_reference*' el valor de la potencia a inyectar (en Watts).

11. Lectura y captura de la señal inyectada con el osciloscopio.

Una vez se está inyectando potencia, se debe realizar la captura de los datos mostrados por el osciloscopio. Para ello, se necesita una memoria externa (en este caso se usa un disquete de memoria tipo *Floppy Disk*).

Una vez realizada la captura, se procede a la desconexión del sistema.

12. Accionar el contactor que abre el circuito entre la red y el inversor (cambio del color del led de verde a rojo).

13. Desactivar la fuente de tensión del lado de corriente alterna.

14. Desactivar la fuente de tensión del lado de corriente continua.

ATENCIÓN: La descarga del bus de continua no es instantánea debido al condensador electrolítico de 2200uF.

15. Quitar la alimentación del armario de control del inversor.

16. Detener el programa Code Composer.

17. Apagar el ordenador.

- **Resultados y conclusiones.**

A continuación se muestra una captura del gráfico obtenido en el osciloscopio, en el que se puede observar la lectura de la corriente inyectada en cada una de las tres fases y la onda de tensión en una de las fases del lado AT del convertidor.

Como se puede observar, la señal correspondiente al canal 5 (color rojo), presenta menos ruido que las demás. Los osciloscopios ofrecen la opción de aplicar un filtro digital para obtener, en la lectura, una señal con menos ruido (forma de onda mejor definida). El hecho que en el canal 5 se haya obtenido una sinusoidal con menos distorsión se debe a que se ha aplicado un filtro de diferente magnitud por error.

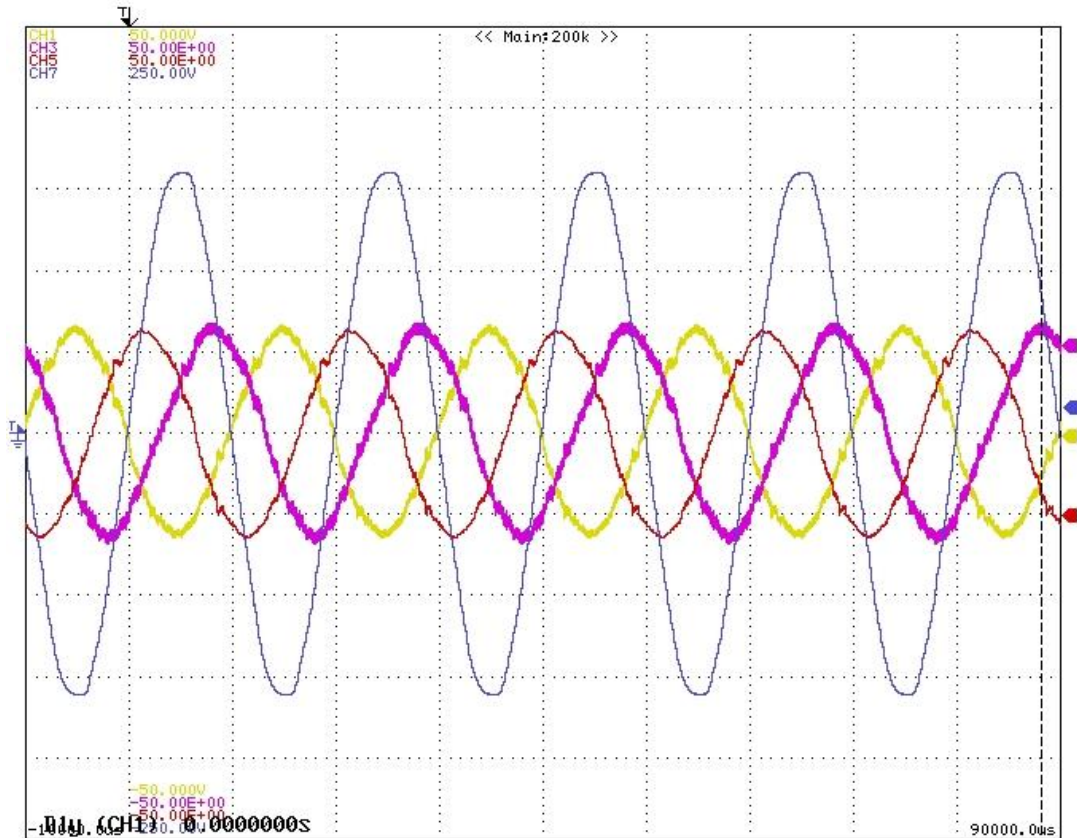


Fig. 59.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. (10mseg/div).

Escala sonda de corriente:	1A/10mV
Escala sonda de tensión:	200/1 V
Escala Osciloscopio:	1/100

Tabla 8.- Escalas de los diferentes elementos de medida, ensayo lazo de corriente.

Lectura de corriente (fase):

$$1,30 \text{ div} \cdot \frac{10 \text{ V}}{1 \text{ div}} \cdot \frac{1 \text{ A}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 13 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cong 9,20 A_{rms}$$

Lectura de tensión (fase):

$$3,25 \text{ div} \cdot \frac{50 \text{ V}}{1 \text{ div}} \cdot \frac{200 \text{ V}}{1 \text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 325 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 229,81 \cong 230 A_{rms}$$

Potencia inyectada:

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 9,20 \cdot 230 \cdot 1 = 6348 \text{ W}$$

En este caso el factor de potencia es igual a uno, ya que la componente reactiva de la corriente inyectada es igual a cero.

La consigna de potencia que se ha introducido para el ensayo es de 6500W. Tras analizar las lecturas obtenidas con el osciloscopio, se observa que el valor de la potencia inyectada es algo inferior (6348 W), lo que significa un error inferior al 3%:

$$Error (\%) = 100 - \left(\frac{6348}{6500} \cdot 100 \right) = 2,34 \%$$

Tras comparar el valor de la potencia obtenida (salida) con la deseada (consigna), se puede concluir que el resultado del test del lazo de corriente es satisfactorio.

A continuación se adjunta una fotografía del convertidor funcionando, con la correspondiente lectura de tensión del Bus DC algo superior a los 240 Vdc (concretamente 247V):



Fig. 60.- Vista general del interior del convertidor . En ella se observan las diferentes partes que lo componen anteriormente presentadas (Pletinas de Cobre, Tarjeta de control, Jtag, Filtro LC, Transformador elevador, etc.), así como la lectura de la tensión en el bus de continua (encima del armario metálico).

5.3. Control de inyección de potencia activa.

- **Objetivos**

En este test se pretende ensayar la respuesta dinámica del convertidor a partir de un salto de potencia activa. De este modo, se evalúa si los controladores están correctamente afinados, ya que se puede observar cómo reacciona la salida (potencia activa inyectada), ante un cambio de la consigna (potencia activa a inyectar).

- **Material**

El listado del material necesario para llevar a cabo este ensayo, es el mismo que el anterior (apartado 5.2), con la particularidad que sólo se usa una de las tres sondas de corriente.

- **Esquema.**

Del mismo modo que pasa con el listado del material, la única diferencia entre el esquema de este montaje y el anterior es la disposición de las sondas de corriente: Sólo se realiza la lectura de una de las tres fases.

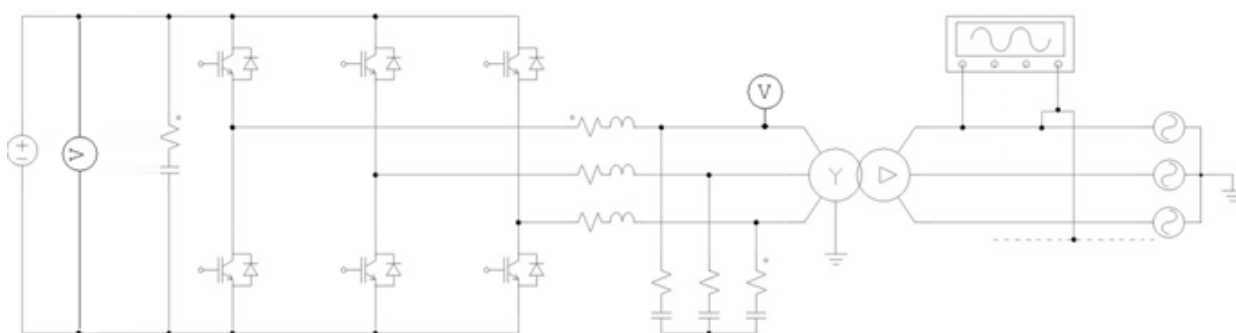


Fig. 61.- Esquema unifilar del montaje para el test del Control de Potencia Activa.

• **Resultados y conclusiones.**

A continuación se muestra una captura del gráfico obtenido en el osciloscopio, en el que se puede observar la lectura de la corriente inyectada para una de las fases (color cian), así como la onda de tensión para la misma fase (color verde).

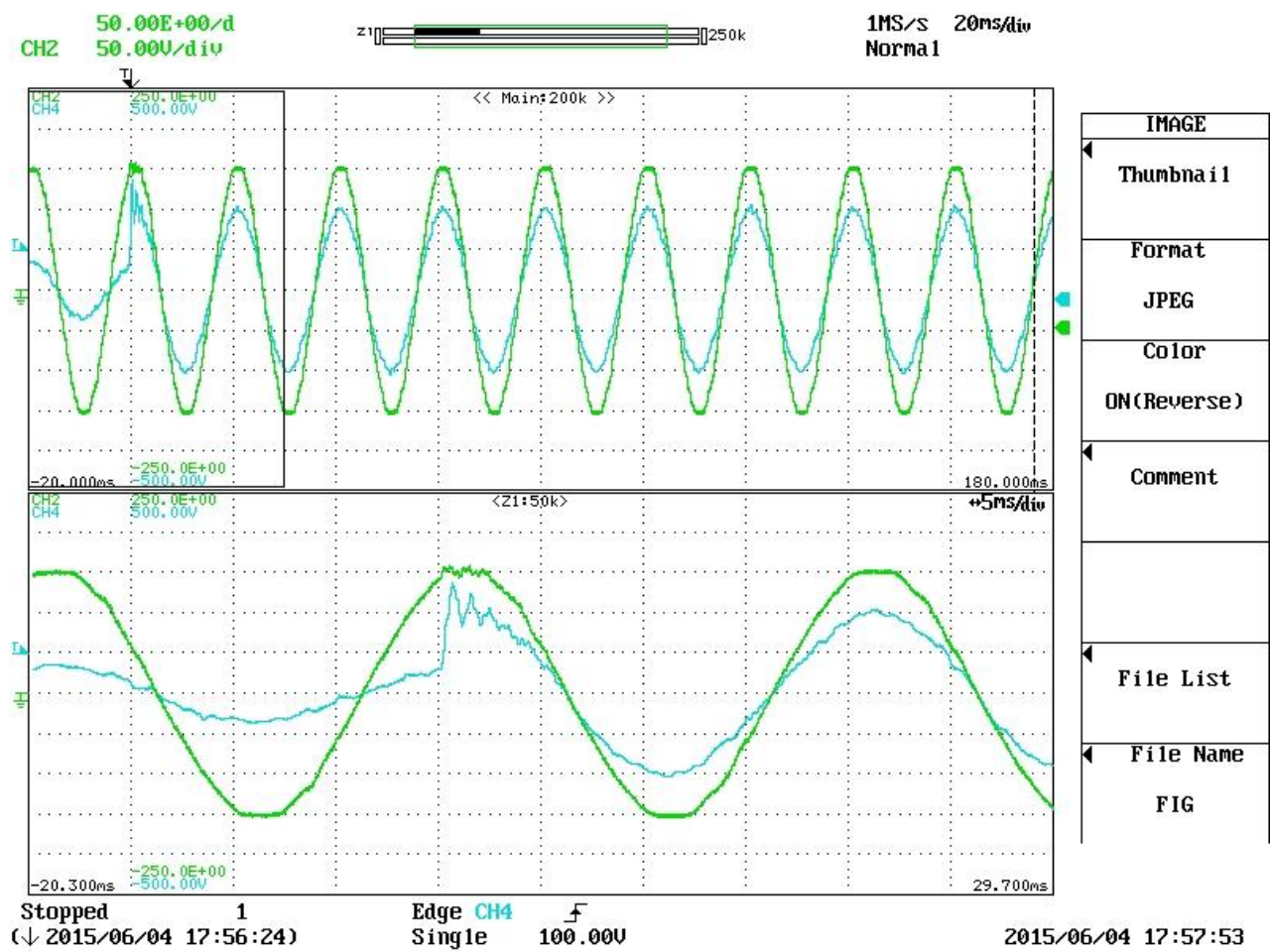


Fig. 62.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. La onda en color cian representa la corriente inyectada en una de las fases. En color verde se observa la tensión para la misma fase. Ventana superior: (20mseg/div) Vista general de las ondas a la salida. Ventana inferior, ZOOM 1: (5mseg/div) Detalle del transitorio para el cambio de consigna.

Escala sonda de corriente:	$1\text{ A}/100\text{ mV}$
Escala sonda de tensión:	$200/1\text{ V}$
Escala Osciloscopio:	$1/100$

Tabla 9.- Escalas de los diferentes elementos de medida, ensayo inyección potencia activa.

Lectura de corriente inicial (fase):

$$0,80 \text{ div} \cdot \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ div}} \cdot \frac{1 \text{ A}}{100 \cdot 10^{-3} \text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 8 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 4 \cdot \sqrt{2} \text{ A}_{\text{rms}}$$

Lectura de corriente final (fase):

$$2 \text{ div} \cdot \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ div}} \cdot \frac{1 \text{ A}}{100 \cdot 10^{-3} \text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 20 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 10 \cdot \sqrt{2} \text{ A}_{\text{rms}}$$

Lectura de tensión (fase):

$$3,25 \text{ div} \cdot \frac{50 \text{ V}}{1 \text{ div}} \cdot \frac{200 \text{ V}}{1 \text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 325 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 229,81 \cong 230 \text{ A}_{\text{rms}}$$

**NOTA: como se puede observar, la tensión de fase satura y no llega a mostrar la onda completa (no se llegan a alcanzar las 3.25 divisiones), esto se debe a una mala regulación de la sonda de tensión.*

Potencia inyectada:

$$P_1 = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 230 \cdot 4\sqrt{2} \cdot 1 = 3900 \text{ W}$$

$$P_2 = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 230 \cdot 10\sqrt{2} \cdot 1 = 9760 \text{ W}$$

Salto de potencia:

$$\Delta P = P_2 - P_1 = 3900 - 9760 \cong 6000 \text{ W}$$

El salto de potencia realizado es de 6kW, tal y como se demuestra en los cálculos anteriores.

En el gráfico principal de la captura (ventana superior), se puede observar cómo las ondas de tensión y corriente no presentan ningún tipo de desfase, lo que verifica que la corriente inyectada es puramente activa.

Al analizar el gráfico ampliado (Zoom 1, ventana inferior), se puede observar que hay un pequeño transitorio de corriente debido al cambio de consigna, pero que en cualquier caso es totalmente insignificante, ya que dura 5mseg (una división).

5.4. Control de inyección de potencia reactiva.

- **Objetivos**

En el ensayo anterior se muestra el comportamiento dinámico del convertidor ante un cambio de consigna sobre la inyección de potencia activa a red. A continuación se realiza un test para evaluar la respuesta dinámica ante un salto de potencia reactiva. Para ello se parte de un estado inicial en el que el convertidor se encuentra inyectando potencia activa a red y se pasa a un segundo estado donde el nivel de potencia reactiva aumenta en 8,50 kVAR, manteniéndose igualmente la inyección de potencia activa inicial.

- **Material**

El listado del material necesario para llevar a cabo este ensayo, es el mismo que el anterior (apartado 5.35.2), con el añadido que en vez de una sola sonda de corriente, se usan las tres (una para cada fase).

- **Esquema.**

El esquema de este ensayo, tampoco difiere mucho del presentado en el ensayo anterior (apartado 5.3). La única diferencia es que, en este caso se vuelven a utilizar las tres sondas de corriente.

- **Resultados y conclusiones.**

Para este experimento se han realizado dos capturas: Una primera en la que se muestra la variación de potencia reactiva (trigger en flanco ascendente) y una segunda en la que se muestra el comportamiento a lo largo del tiempo, con la tensión en el bus de continua.

De la primera captura no se dispone de imágenes, debido a un problema con el disquete que se ha usado para la adquisición de los datos.

Aún y así, se dispone de la captura del segundo gráfico, donde se observa un estado inicial en el que se está inyectando una cierta potencia activa. A continuación

se añade un cierto nivel de reactiva, y finalmente el nivel de reactiva vuelve a situarse en los 0 Var, inyectando nuevamente sólo potencia activa.

En el gráfico que se adjunta, no se aprecia el pequeño transitorio provocado por el cambio de consigna, pero sí que se puede analizar la magnitud del cambio, así como otros factores que a continuación se detallan:

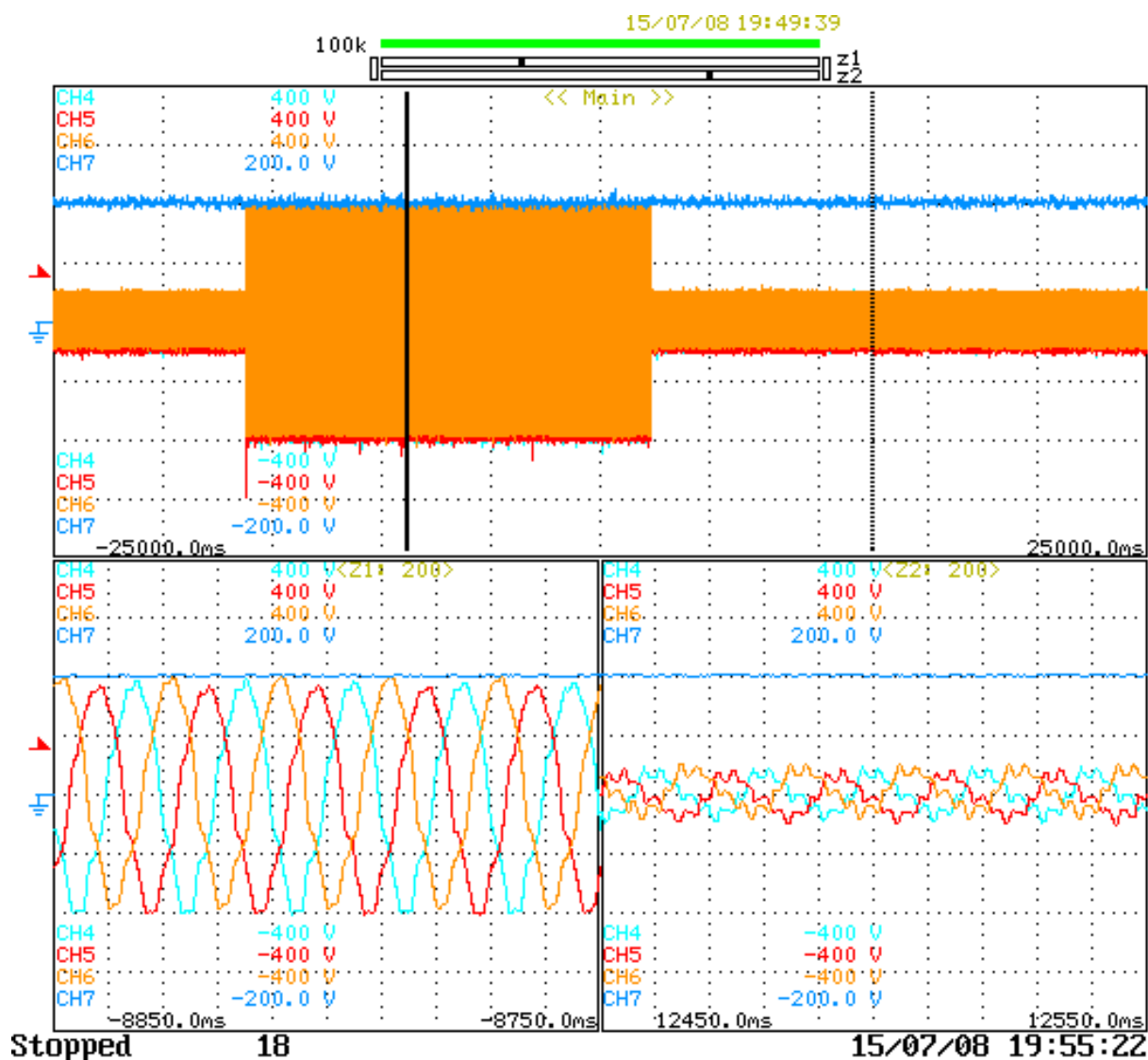


Fig. 63.- Gráfico superior: (5seg/div) Comportamiento dinámico ante un escalón de potencia reactiva. ZOOM 1: (10mseg/div) Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color naranja, rojo y cian son lecturas de la onda de corriente (8,50 kVar y 2,50 kW). En color azul se observa la lectura de la tensión DC. ZOOM 2: (10mseg/div) Se observan las mismas señales, pero para un nivel de potencia inferior (2,50kW y 0 kVar). Se demuestra que la potencia reactiva NO depende de la tensión DC ya que se mantiene constante, pese al cambio de consigna.

Escala sonda de corriente:	$1\text{ A}/10\text{ mV}$
Escala sonda de tensión:	$200/1\text{ V}$
Escala Osciloscopio:	$1/100$

Tabla 10.- Escalas de los diferentes elementos de medida, ensayo inyección potencia reactiva.

Lectura de corriente inicial (fase):

$$0,50\text{ div} \cdot \frac{10\text{ V}}{1\text{ div}} \cdot \frac{1\text{ A}}{10 \cdot 10^{-3}\text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 5 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 2,5 \cdot \sqrt{2}\text{ A}_{\text{rms}}$$

Lectura de corriente final (fase):

$$1,80\text{ div} \cdot \frac{10\text{ V}}{1\text{ div}} \cdot \frac{1\text{ A}}{10 \cdot 10^{-3}\text{ V}} \cdot \frac{1}{100} = 18 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 9 \cdot \sqrt{2}\text{ A}_{\text{rms}}$$

Potencia inyectada:

$$P_1 = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi = 3 \cdot 230 \cdot 2,50 \sqrt{2} \cdot 1 \cong 2500\text{ W}$$

$$S_2 = 3 \cdot U_f \cdot I_f = 3 \cdot 230 \cdot 9 \sqrt{2} \cong 8800\text{ W}$$

$$Q_2 = \sqrt{(S_2)^2 - (P_1)^2} = \sqrt{8800^2 - 2500^2} \cong 8500\text{ kVAR}$$

El salto de potencia reactiva realizado es de 8,50 kVAR, ya que en un inicio sólo se está inyectando potencia activa.

Como se puede observar, la señal azul (tensión en el bus de continua) no sufre ninguna variación ante el escalón de potencia reactiva. Ello es debido a que la corriente que provoca la componente reactiva de la potencia procesada por el inversor, no es la que proviene del bus de continua, sino que es absorbida del lado de la red. El bus de continua en todo momento está inyectando la corriente necesaria para mantener los 2,50 kW.

La práctica de inyectar potencia reactiva es muy utilizada, sobretodo en el momento del arranque del generador eólico (para magnetizarlo inicialmente) o en caso de cortocircuito en la red (para que no se desmagnetice).

5.5. Test del algoritmo del MPPT (Maximum Power Point Tracking).

- **Objetivos**

Tras comprobar que el lazo de corriente funciona correctamente (error entre consigna y señal de salida prácticamente nulo), el siguiente paso es aplicar una estrategia de seguimiento del punto de máxima potencia. La finalidad de esta estrategia es controlar la potencia inyectada a red en función de la tensión en el bus de continua.

Para ello, la variable que regula la potencia inyectada, ya no puede ser modificada por el usuario (como sí lo era anteriormente, a través de la tabla dinámica), sino que pasa a depender de la lectura de la tensión en bornes del condensador del bus.

- **Material**

El listado del material necesario para llevar a cabo este ensayo, es el mismo que el anterior (apartado 5.3).

- **Esquema.**

El esquema de este ensayo, tampoco difiere mucho del presentado en el ensayo anterior (apartado 5.3). La única diferencia es que, en este caso se vuelven a utilizar las tres sondas de corriente.

A continuación se muestra una imagen del montaje real, en la que se pueden identificar las partes que aparecen en el esquema mencionado:

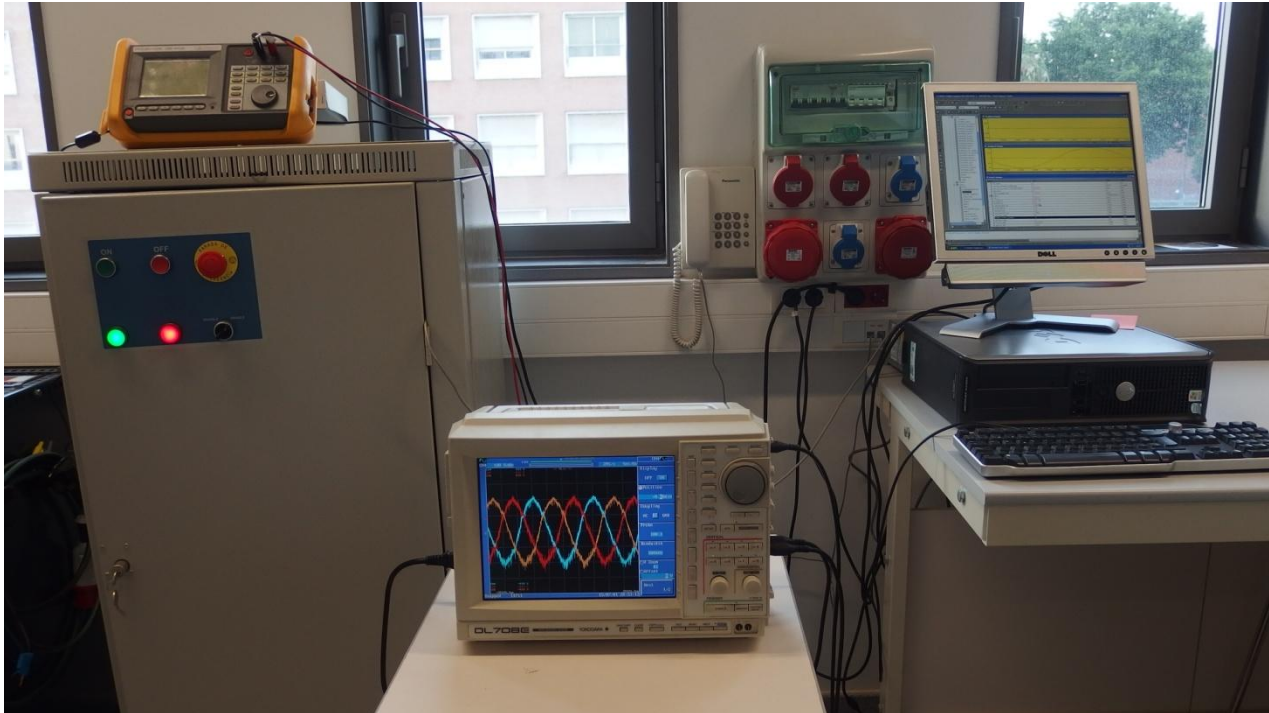


Fig. 64.- Imagen completa del Setup. De izq. a der: Inversor (con un multímetro mostrando la lectura de Vdc), Osciloscopio (mostrando la onda de la corriente inyectada a red), PC (donde se muestra la tabla dinámica y los dos gráficos que el operario puede elegir qué lectura ver). Faltan por mostrar las fuentes DC y AC.

- **Procedimiento.**

El procedimiento seguido hasta tener el sistema listo para trabajar, es el mismo que en los ensayos anteriores. La particularidad de este test viene una vez se ha establecido la conexión convertidor-PC y hay tensión tanto en el lado de red (lado de corriente alterna) como en el lado del bus (lado de corriente continua):

1. Accionar el contactor de red del inversor (cambio del color del led de rojo a verde).

En este instante, el inversor se encuentra preparado para inyectar potencia a red, a falta que el usuario lo indique mediante la variación de una de las entradas de la tabla dinámica (cambiar de '0' a '1' el parámetro 'enable_inverter_operation').

2. Habilitar, mediante la tabla dinámica, la inyección de potencia a red.

Se inicia la conmutación de los IGBTs, y la consecuente transformación de la corriente continua a corriente alterna.

3. Introducir la consigna de potencia que se pretende inyectar.

En este caso, la potencia a inyectar ya no depende de un parámetro numérico que introduce el usuario, sino que su valor va ligado al nivel de tensión en el bus de continua. El usuario debe modificar la tensión en el bus de continua desde un valor inicial de 220 Vdc hasta 270 Vdc, con variaciones de unos 10V para realizar diferentes lecturas.

4. Lectura y captura de la señal inyectada con el osciloscopio.

Una vez se está inyectando potencia, se debe realizar la captura de los datos mostrados por el osciloscopio. Para ello, se necesita una memoria externa (en este caso se usa un disquete de memoria tipo *Floppy Disk*). Se realiza una captura para cada uno de los diferentes niveles de tensión en el bus de continua.

Una vez realizada la captura, se procede a la desconexión del sistema.

• Resultados y conclusiones.

Tal y como se explica anteriormente (apartado 5.5), el seguimiento del punto de máxima potencia se lleva a cabo mediante la ecuación de una recta. Si bien es cierto que el comportamiento no es exactamente lineal, se ha decidido realizar una aproximación y aceptar dicho planteamiento como válido.

De este modo, la ecuación que regula la potencia inyectada a la red, es la siguiente:

$$P_{reference} = k_{escala} \cdot (100 \cdot Vdc_{bus} - 20000)$$

(NOTA: Este algoritmo no es el que ha quedado reflejado en el código final, pero en cualquier caso es el que se usó para este test y, aunque no se llega a inyectar la potencia nominal, se demuestra que la salida sigue a la consigna).

A continuación se muestran las lecturas de corriente inyectada para distintos niveles de tensión en el bus de continua:

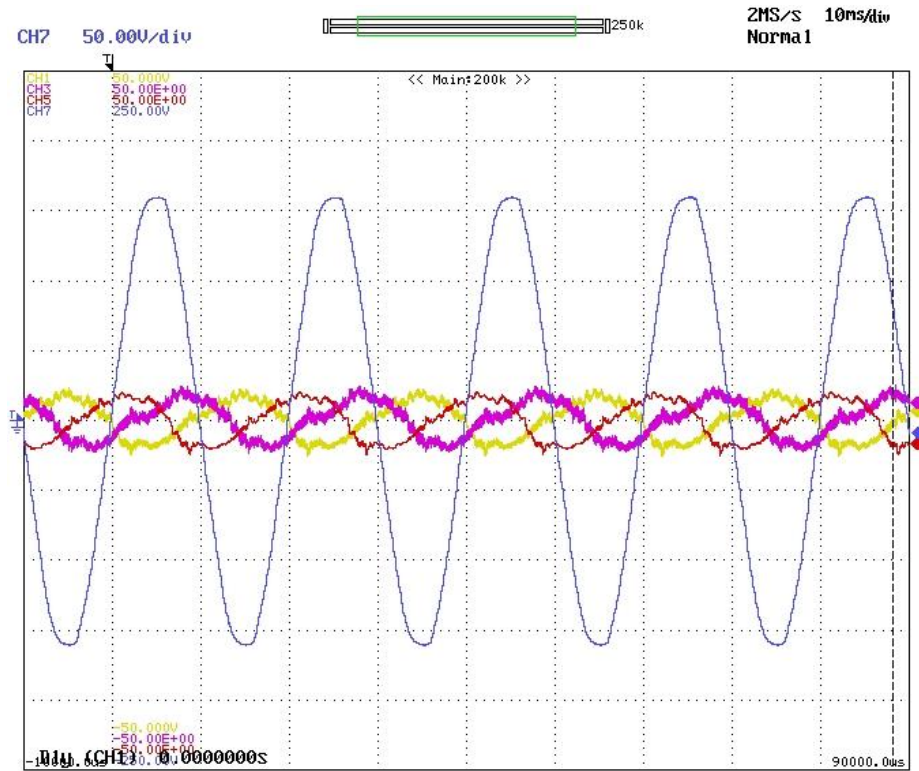


Fig. 65.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 2kW. (10mseg/div).

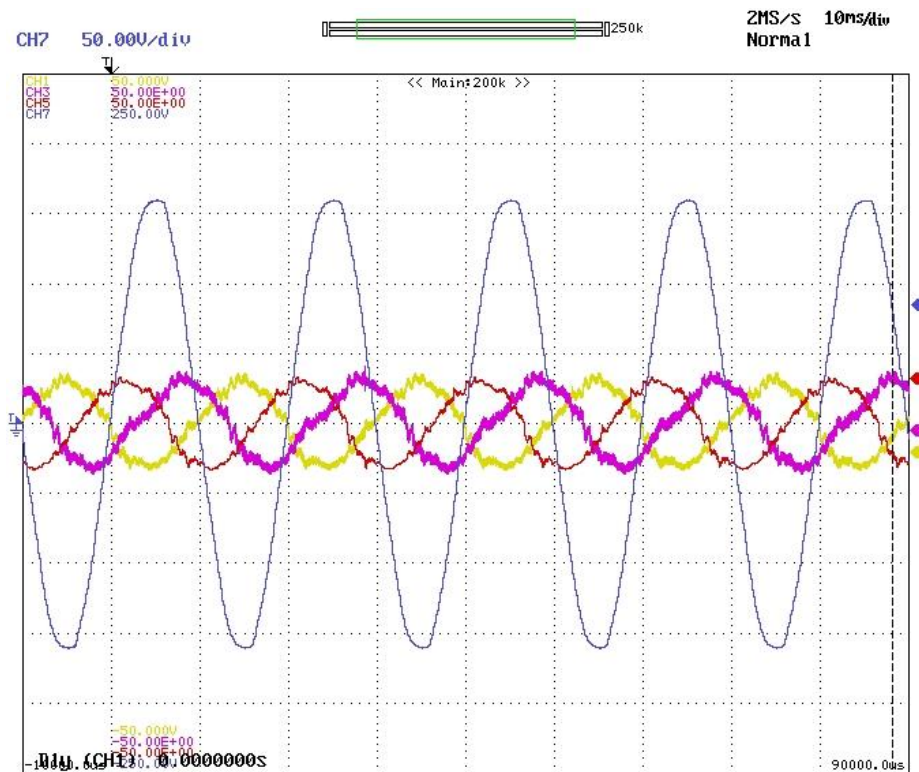


Fig. 66.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 3,50kW. (10mseg/div).

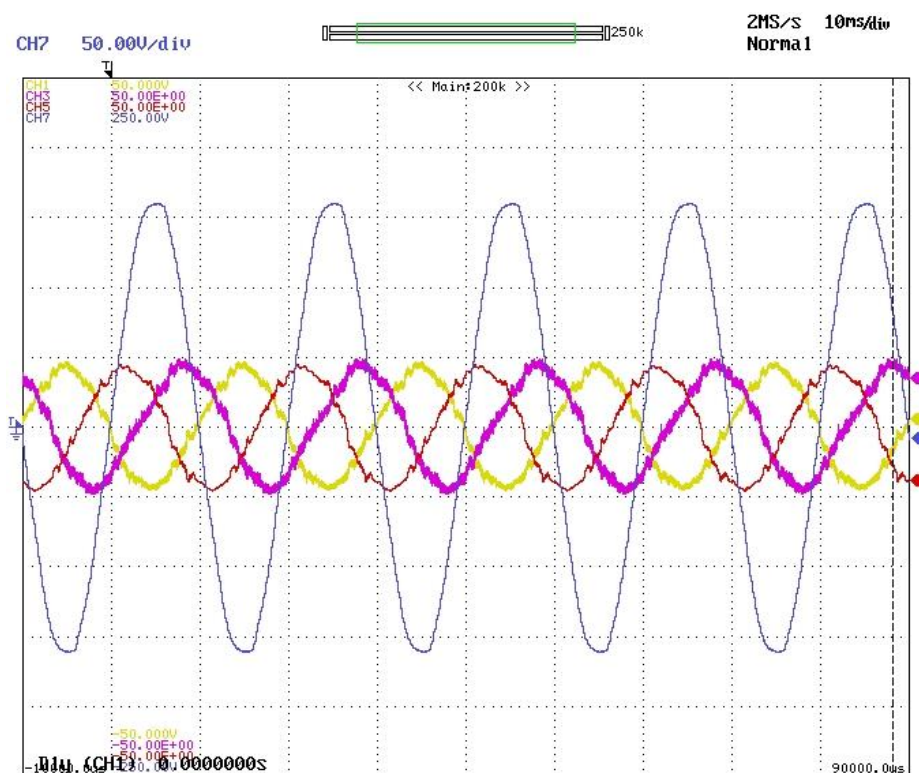


Fig. 67.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 4,50kW. (10mseg/div).

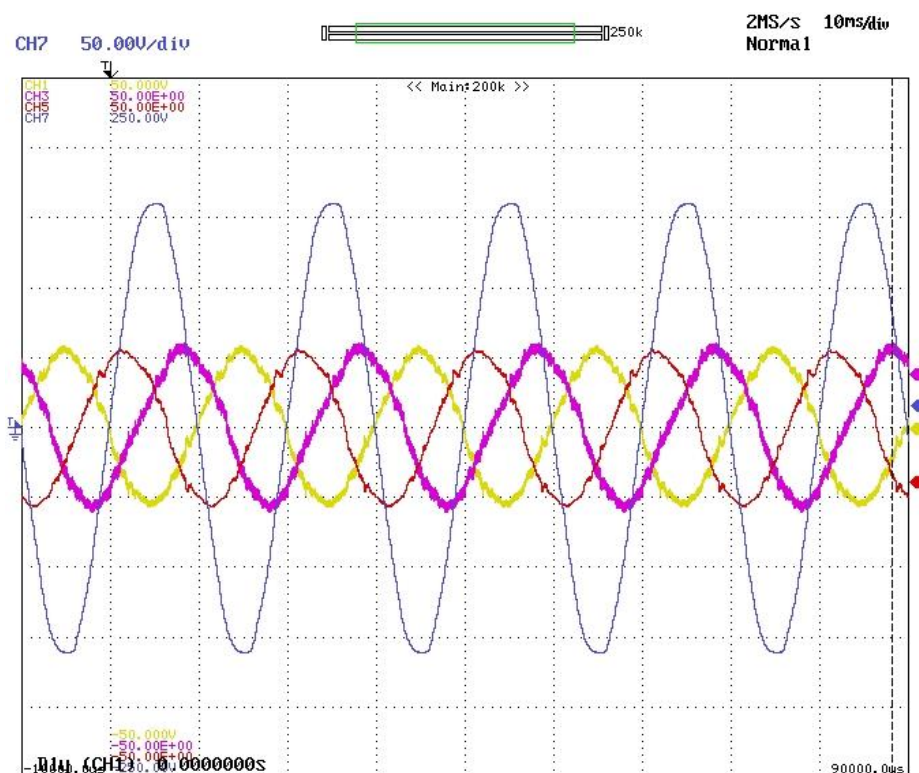


Fig. 68.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 5,50kW. (10mseg/div).

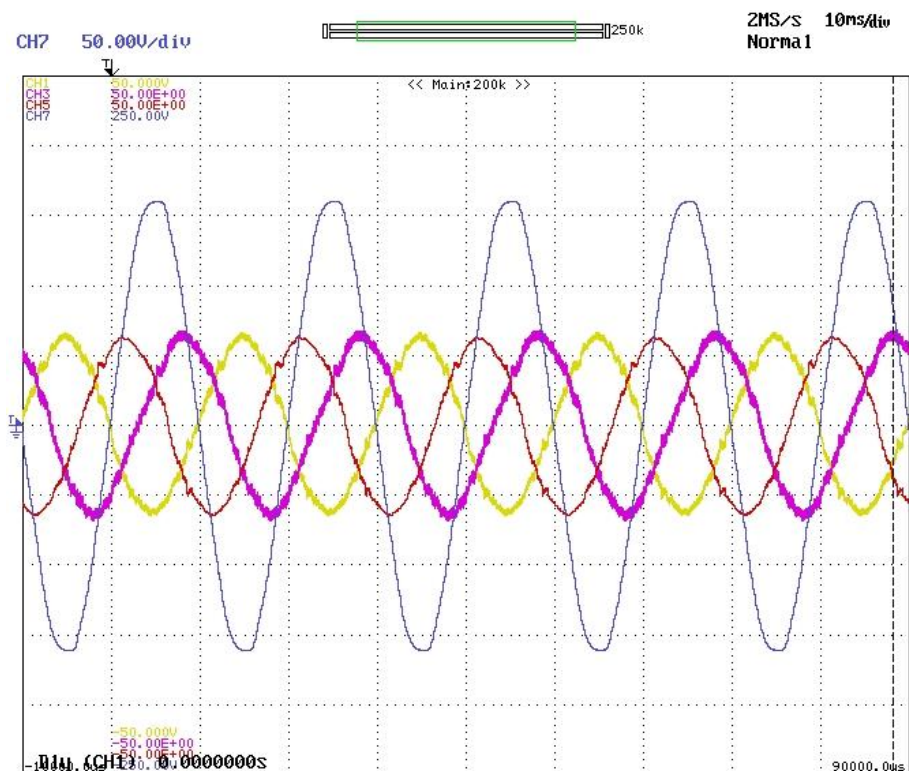


Fig. 69.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 6,50kW. (10mseg/div).

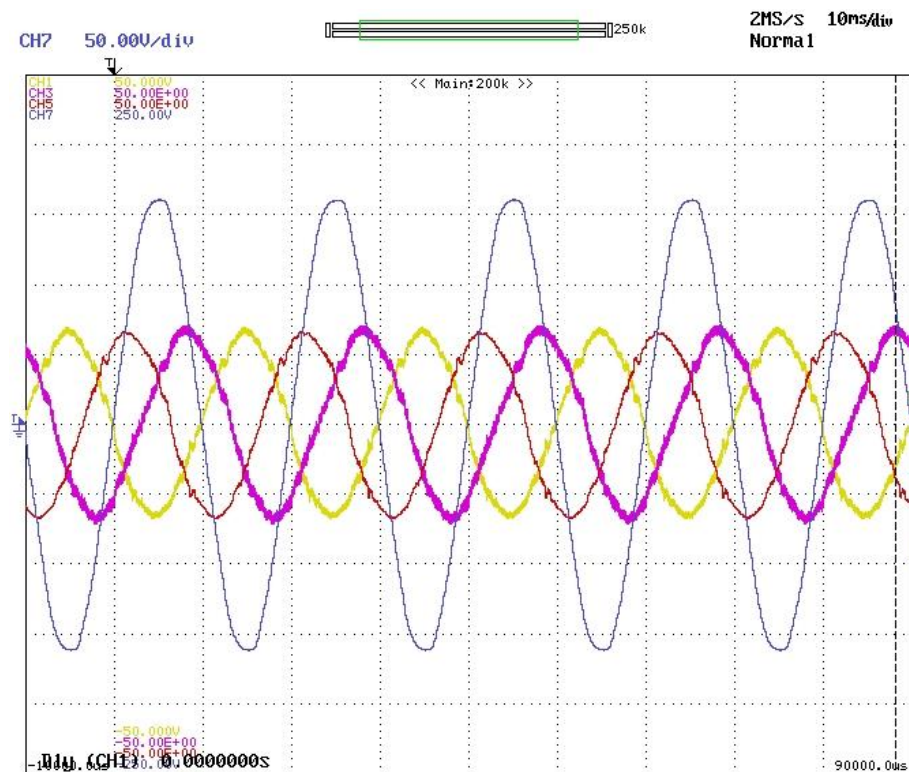


Fig. 70.- Lectura de la señal a la salida del convertidor y en el lado AT del transformador. Las señales en color magenta, amarillo y rojo son lecturas de la onda de corriente. En color azul se observa la lectura de la onda de tensión. Lectura para inyección de 7 kW. (10mseg/div).

Las escalas de los diferentes elementos que intervienen en la captación de la señal son las mismas que se presentan en apartados anteriores (Tabla 10).

A continuación se presenta una tabla resumen en la que se recoge la tensión en el bus de continua (lectura tomada a partir de un multímetro), corriente inyectada (tomada a partir de los gráficos anteriores), potencia teórica (a partir de la ecuación del MPPT y sabiendo la tensión en el bus de continua) y potencia real (calculada a partir de la lectura de tensión C.A. y corriente inyectada).

Tensión Bus CC (V)	Corriente inyectada (Arms)	Potencia teórica (W)	Potencia real (W)
220	2,82	2000	1945,80
235	4,95	3500	3415,50
245	6,72	4500	4636,80
255	7,78	5500	5368,20
265	9,19	6500	6341,10
270	9,90	7000	6831,00

Tabla 11.- Tabla-Resumen con las lecturas de los gráficos anteriores.

- El valor de la columna '*Potencia Teórica*' se obtiene a partir de la ecuación anteriormente definida para el MPPT:

$$P_{Teorica} = 100 \cdot V_{dc} - 20000$$

Por ejemplo, si se aplica para la primera de las lecturas, se verifica que:

$$P_{Teorica} = 100 \cdot 220 - 20000 \rightarrow P_{Teorica} = \mathbf{2000\ W}$$

- El valor de la columna '*Potencia Real*' se obtiene a partir de aplicar el cálculo eléctrico de potencia, conociendo tensión y corriente:

$$P_{Real} = 3 \cdot V_{F,rms} \cdot I_{F,rms}$$

Por ejemplo, si se aplica para la primera de las lecturas, se verifica que:

$$P_{Real} = 3 \cdot 230 \cdot 2,82 \rightarrow P_{Real} = \mathbf{1945,80\ W}$$

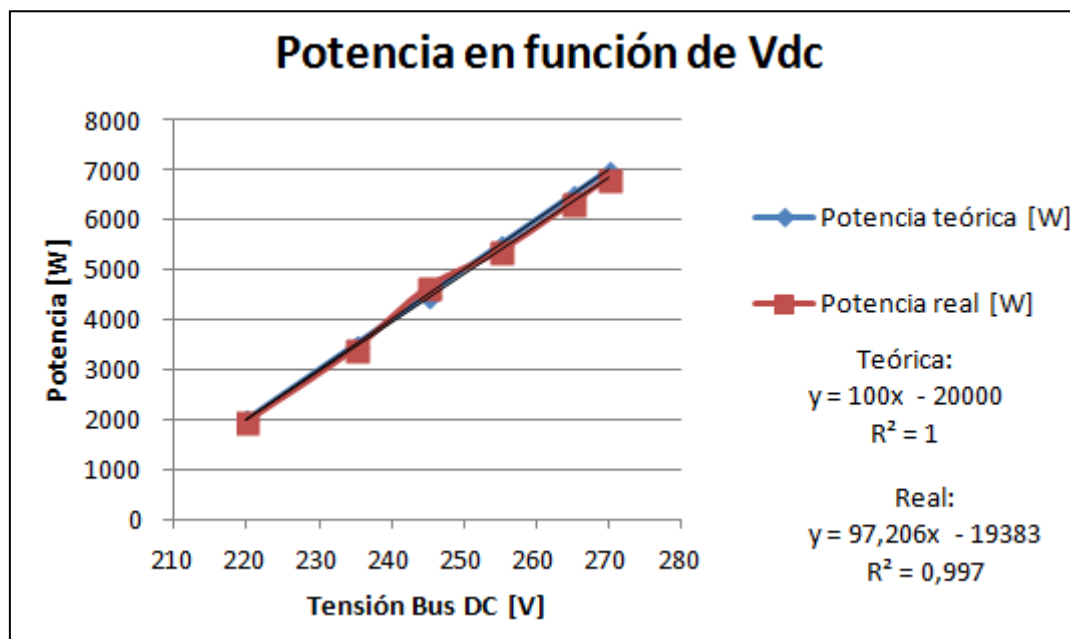


Fig. 71.- Comparación entre la curva que describe la potencia teórica y la de la potencia obtenida

Como se puede observar en el gráfico anterior, la recta de la potencia inyectada a red en comparación con la teórica es prácticamente la misma, por lo que se puede afirmar que el seguimiento del punto de máxima potencia funciona correctamente.

5.6. Test de la Máquina de Estados.

• Objetivos

La máquina de estados, tal y como se explica en el punto 4.5.1, es la parte del código encargada de activar una salida u otra en función de diversos parámetros de entrada.

En este experimento se pretende testear el comportamiento de dicha máquina, por lo que se modificarán diferentes parámetros de entrada, tales como la tensión en el bus de continua, la del lado de red, etc. y se comprobará que la respuesta del inversor es la deseada.

Para ello, se realizan tres ensayos diferentes:

- Respuesta del convertidor ante caída de tensión en el Bus de continua.
- Respuesta del convertidor ante caída de tensión de la red.

Es de gran ayuda tener presente el diagrama de flujo dónde se refleja el comportamiento de la máquina de estados en función de los diferentes parámetros de entrada. Este diagrama se presenta anteriormente (Fig. 52).

- **Procedimiento.**

El procedimiento seguido hasta tener el sistema listo para trabajar, es el mismo que en los ensayos anteriores. La particularidad de este test viene una vez se ha establecido la conexión convertidor-PC y hay tensión tanto en el lado de red (lado de corriente alterna) como en el lado del bus (lado de corriente continua). A continuación se detalla, para cada uno de los casos, el procedimiento a seguir una vez ya se tiene el sistema en marcha.

- **Respuesta del convertidor ante caída de tensión en el Bus DC.**

Para este primer test, se pretende comprobar que cuando la tensión en el bus de continua baje de un cierto nivel, se deshabilite la conmutación para evitar flujos de potencia negativos (de AC a DC).

Para ello, se parte de un estado de reposo (bajo el nombre de “*Stand_by_Mode*”) en el que la tensión en el bus de continua es menor que el mínimo establecido ($V_{dc_bus_filter} < V_{dc_low_limit}$).

A continuación se sube la tensión del bus de continua (modificando la posición de uno de los bornes del auto transformador) hasta un valor de 240 V (valor superior al nivel mínimo establecido) y con ello, se activa automáticamente la inyección de potencia. Es decir, el inversor pasa a estar en el modo número 4: INVERTER_MODE.

Una vez inyectando potencia, se vuelve a bajar el valor de la tensión del bus de continua hasta rebajar el límite inferior establecido, y con ello, se pasa del estado 4, anteriormente mencionado, al 5: STAND_BY_MODE.

- **Respuesta del convertidor ante caída de tensión de la red.**

En este caso, al igual que en anterior, se pretende verificar que la conmutación de los IGBTs se detiene en caso que sea necesario. El parámetro que se pretende regular ahora es el nivel de la tensión de red.

Para ello, se parte de un estado inicial de inyección de potencia (caso número 4 dentro de la máquina de estados).

A continuación se va disminuyendo la tensión en el lado de red hasta que se llega a un valor menor que el límite inferior establecido, que para este caso es una diferencia de potencial ($V_{grid_agregated_filter} \leq (V_{GRID_NOMINAL_AGGREGATED} - V_{ac_drop_limit})$), pasando el inversor a un estado de reposo (caso número 5).

Para volver a inyectar potencia, el nivel de tensión en el lado de corriente alterna debe volver a ser superior a la caída de potencial anteriormente presentada.

• **Resultados y conclusiones.**

A continuación se presentan los gráficos obtenidos de los diferentes test explicados anteriormente. Para todos los casos se muestra una lectura de la corriente inyectada (onda sinusoidal trifásica) y el nivel de la tensión en bornes del bus de continua (representada en azul).

- **Respuesta del convertidor ante caída de tensión en el Bus DC.**

Una vez realizado el procedimiento anteriormente descrito, la respuesta de la potencia inyectada por el inversor en función del nivel de la tensión en el bus de continua, es la siguiente:

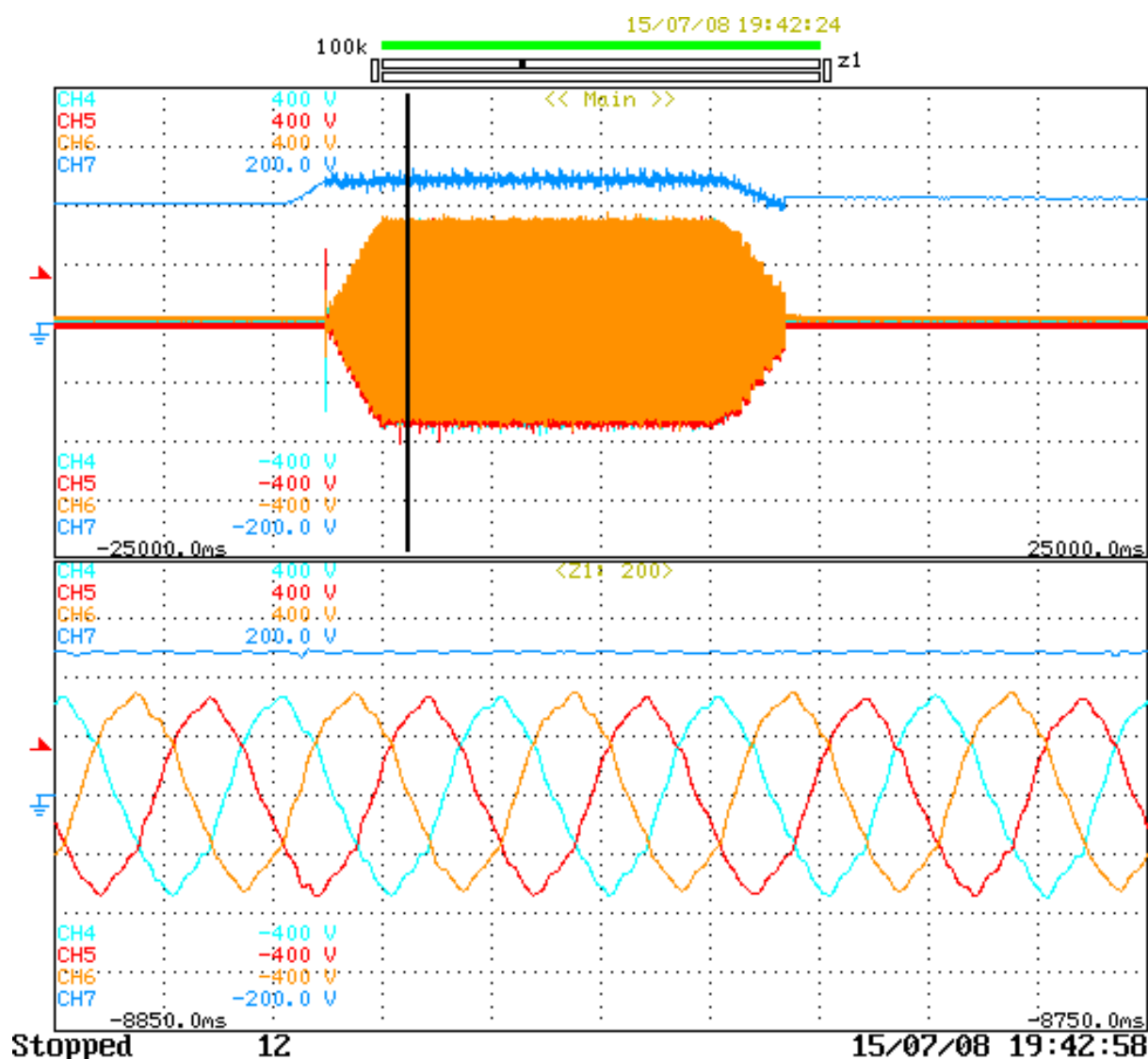


Fig. 72.- Gráfico Superior: (5seg/div) Vista general del comportamiento del convertidor cuando se produce una caída de tensión en el Bus DC. ZOOM 1: (10mseg/div) Detalle de la onda de corriente inyectada. Para ambos gráficos: las señales en color cian, naranja y rojo, representan la corriente inyectada. La señal en azul es el nivel de tensión DC.

- **ZOOM 1** (ventana superior de la imagen): En esta captura se distinguen tres zonas:
 1. **Reposo inicial.** Dado que inicialmente se parte de un estado de reposo (o *Stand By* estado número 5), la lectura de la corriente inyectada es cero.
Se puede observar también cómo la tensión en el bus de continua (señal azul) toma un valor de 200V, que es inferior al mínimo valor mínimo, $V_{dc_low_limit}$.

- 2. Conmutación.** Mediante la variación de una de los bornes del auto transformador, se va aumentando la tensión en bornes del bus de continua. Una vez superado el nivel de tensión descrito bajo el parámetro $V_{dc_high_limit}$ se activa la conmutación (pasando a estar el inversor en el estado número 4). En este caso, la tensión en el bus de continua se ha aumentado hasta un valor de 240V.

En el gráfico se puede observar cómo poco a poco se va aumentando la tensión de continua hasta cuando se activa la conmutación. En ese instante hay un ruido inicial, debido al cierre del contactor que habilita los IGBTs.

Seguidamente se observa una rampa creciente hasta que se llega al valor deseado. Esta rampa es la que se explica en el apartado 4.5.2, cuya función es ofrecer un inicio de inyección de potencia más suave y controlado.

- 3. Fin de la conmutación.** En este tercer tramo del gráfico se observa cómo el inversor vuelve a un estado de reposo (se posiciona en el estado número 5, *Stand_by_mode*). Para ello, se disminuye la tensión del bus de continua (actuando sobre el auto transformador de la fuente de tensión regulable). En el momento que se rebaja el límite inferior (establecido según $V_{dc_low_limit}$), se puede observar como la conmutación se detiene, volviendo a ser la tensión en bores del bus de continua los 200V iniciales.

- **ZOOM 2:** (ventana inferior de la imagen). En esta captura se realiza una ampliación de la zona de conmutación. En ella se observa la corriente inyectada a red, en forma de onda sinusoidal trifásica, así como el nivel de tensión en el bus de corriente continua, y su pequeño rizado (señal azul).
El valor de la corriente inyectada es de 16 A (pico).

- **Respuesta del convertidor ante caída de tensión de la red.**

Una vez realizado el procedimiento anteriormente descrito, la respuesta de la potencia inyectada por el inversor en función del nivel de la tensión en la red de corriente alterna, es la siguiente:

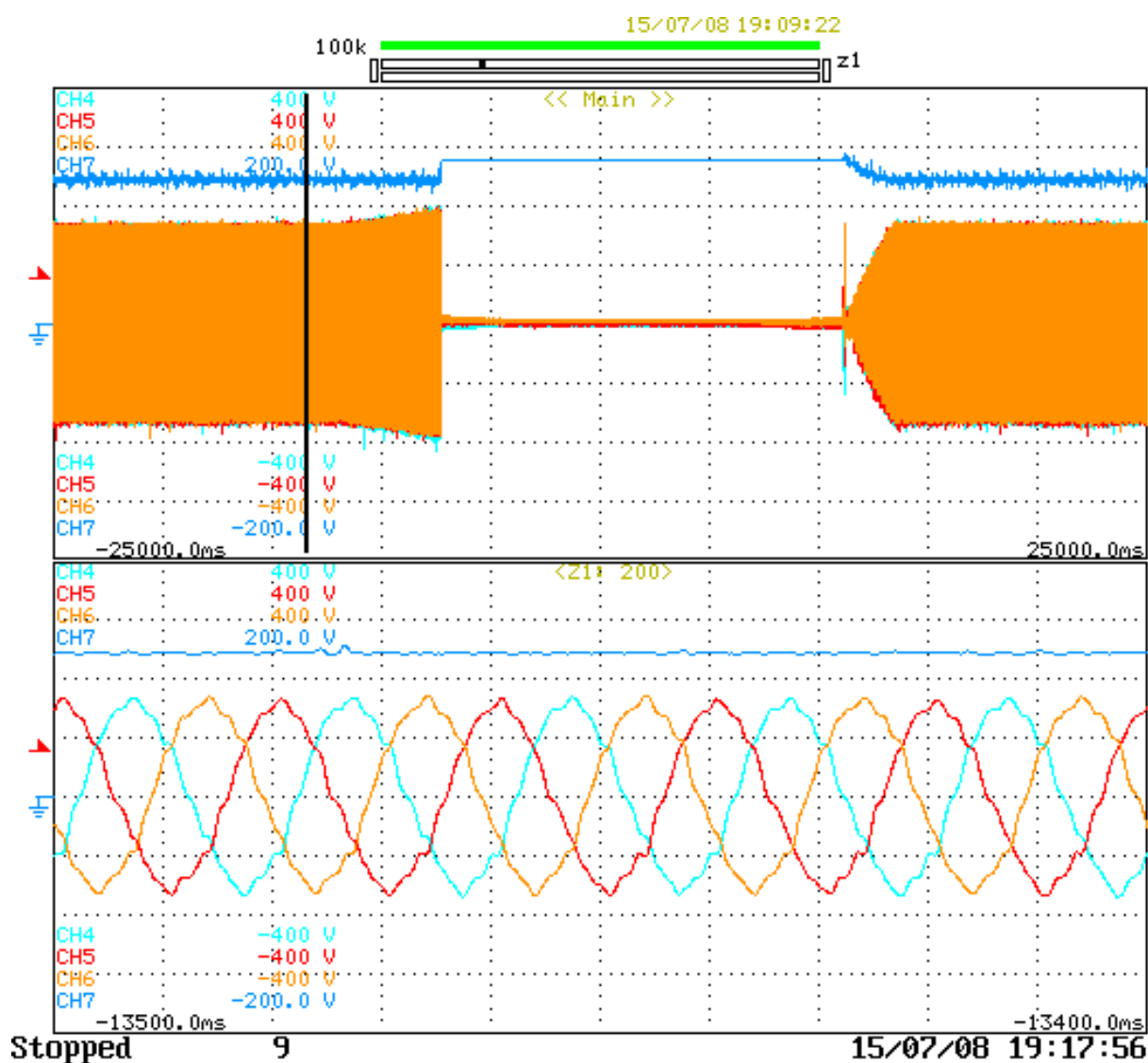


Fig. 73.- Gráfico Superior: (5seg/div) Vista general del comportamiento del convertidor cuando se produce una caída de tensión en la red (lado AC). ZOOM 1: (10mseg/div) Detalle de la onda de corriente inyectada. Para ambos gráficos: las señales en color cian, naranja y rojo, representan la corriente inyectada. La señal en azul es el nivel de tensión DC.

- **ZOOM 1** (ventana superior de la imagen): En esta captura se distinguen tres zonas:

1. **Conmutación.** En este ensayo se pretende demostrar que ante una caída de potencial de la red, el convertidor detenga su conmutación, pasando de un estado inicial de *Inverter_Mode* al estado de reposo (es decir *Stand_by_mode*).

Para ello, se disminuye la tensión del lado de red hasta rebajar o igualar el nivel mínimo indicado en el código que conduce la máquina de estados, es decir $V_{GRID_NOMINAL_AGGREGATED} - V_{ac_drop_limit}$.

Conforme va disminuyendo la tensión en el lado de alterna, se puede observar cómo incrementa ligeramente la corriente inyectada a red. Este efecto se debe a que la consigna de potencia depende de la tensión del bus de continua ($P_{ref} = X \cdot V_{dc} - Y$), a la vez que es el resultado del producto entre la tensión y la intensidad inyectadas a red ($P = \sqrt{3} \cdot U_N \cdot I_N \cdot \cos \varphi$). Para mantener la inyección del mismo nivel de potencia, en caso de disminuir la tensión en el lado de red (la U_N de la ecuación anterior) se deberá aumentar el valor de la intensidad inyectada (la I_N de la ecuación anterior).

2. **Reposo.** Una vez el convertidor está en el estado número 5 (*Stand_by_mode*), se puede observar cómo la lectura de la corriente inyectada a red es cero. Para inyectar potencia de nuevo a red, el nivel de la tensión en el lado de alterna tiene que volver a ser superior al establecido según el código programado de la máquina de estados, $V_{GRID_NOMINAL_AGGREGATED} - V_{ac_drop_limit}$.

Si se analizan los niveles de tensión en el bus de continua, se puede observar cómo en un inicio (cuando se está en reposo), se parte de una tensión de 270 V y tras la re-conexión de los IGBTs, ésta pasa a valer 240 V. Ello se debe a la caída de potencial eléctrico que sufre el bus cuando se realiza la inyección de potencia, debido a que se inicia la circulación de un cierto flujo de potencia desde el lado de continua al de alterna.

3. **Re-conexión de la conmutación.** En este tercer tramo del gráfico se observa cómo se vuelve a activar la conmutación de los IGBTs (se pasa al estado número 4, *Inverter_mode*) y la correspondiente inyección de potencia a red. Se observa cómo (al igual que en el caso anterior), la conmutación tiene una pequeña rampa inicial para evitar comportamientos bruscos que generan transitorios iniciales no deseados.

- **ZOOM 2:** (ventana inferior de la imagen). En esta captura se realiza una ampliación de la zona de conmutación. En ella se observa la corriente inyectada a red, en forma

de onda sinusoidal trifásica, así como el nivel de tensión en el bus de corriente continua, y su pequeño rizado (señal azul).

El valor de la corriente inyectada es de 16 A (pico).

5.7. Tasa de Distorsión Armónica en la corriente inyectada. %THDi

- **Objetivos**

Uno de los requisitos con los que tiene que cumplir el convertidor a la hora de inyectar potencia a red, es el índice de distorsión armónica que tiene la señal inyectada. Se calcula en tanto por ciento, y la información que ofrece es útil para determinar la calidad de la corriente que se está procesando: En un hipotético caso ideal, el valor del THDi sería igual a la unidad ($THDi=1\%$), mientras que, a medida que éste valor aumenta, la calidad de la onda es peor, ya que tiene más distorsión.

En este experimento se realiza la captura de la corriente inyectada para cada una de las tres fases del convertidor, y se analiza mediante Matlab la distorsión de la corriente (en tanto por cien) que se está enviando hacia la red.

- **Resultados y conclusiones.**

Una vez se ha capturado mediante el osciloscopio el resultado de la inyección de corriente y se han guardado los datos de las tres ondas en tres archivos diferentes, llega el momento de realizar el tratamiento de los datos adquiridos mediante Matlab, para obtener el nivel de la tasa de distorsión armónica para cada una de las tres fases. Las capturas obtenidas son las siguientes:

- Fase R:

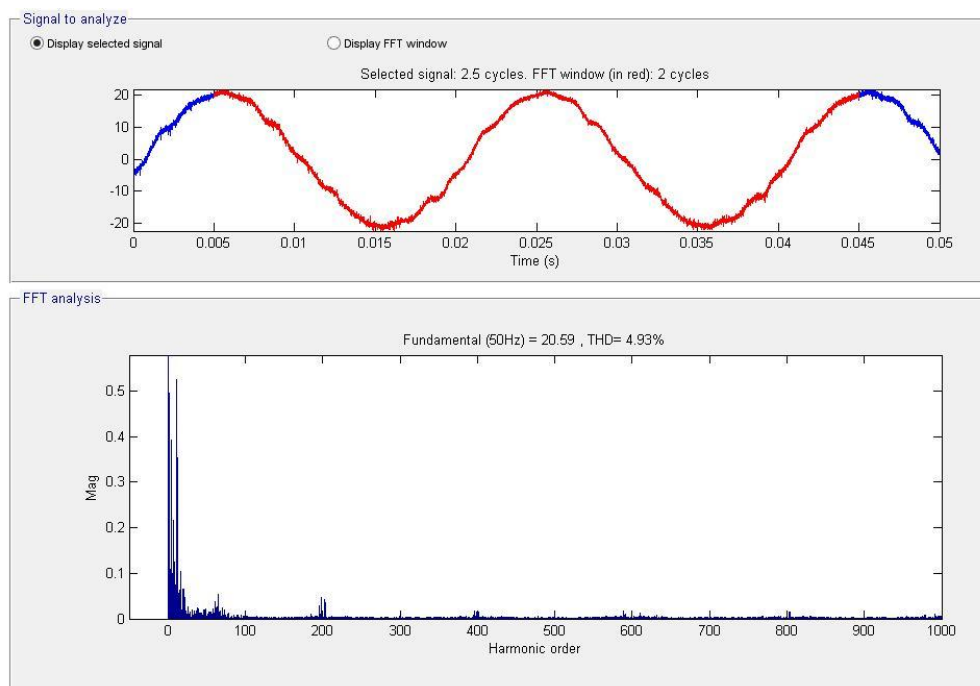


Fig. 74.- Gráfico Superior: Representación de la onda de corriente inyectada a partir de la adquisición de datos para la fase R. Gráfico Inferior: Representación del %THDi para dicha fase.

- Fase S:

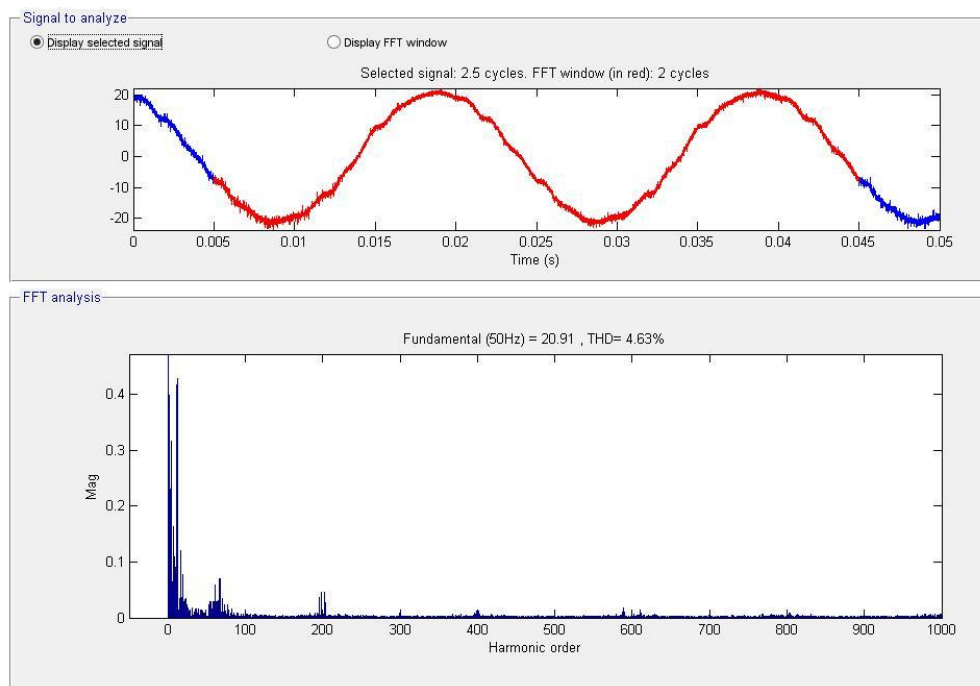


Fig. 75.- Gráfico Superior: Representación de la onda de corriente inyectada a partir de la adquisición de datos para la fase S. Gráfico Inferior: Representación del %THDi para dicha fase.

- Fase T:

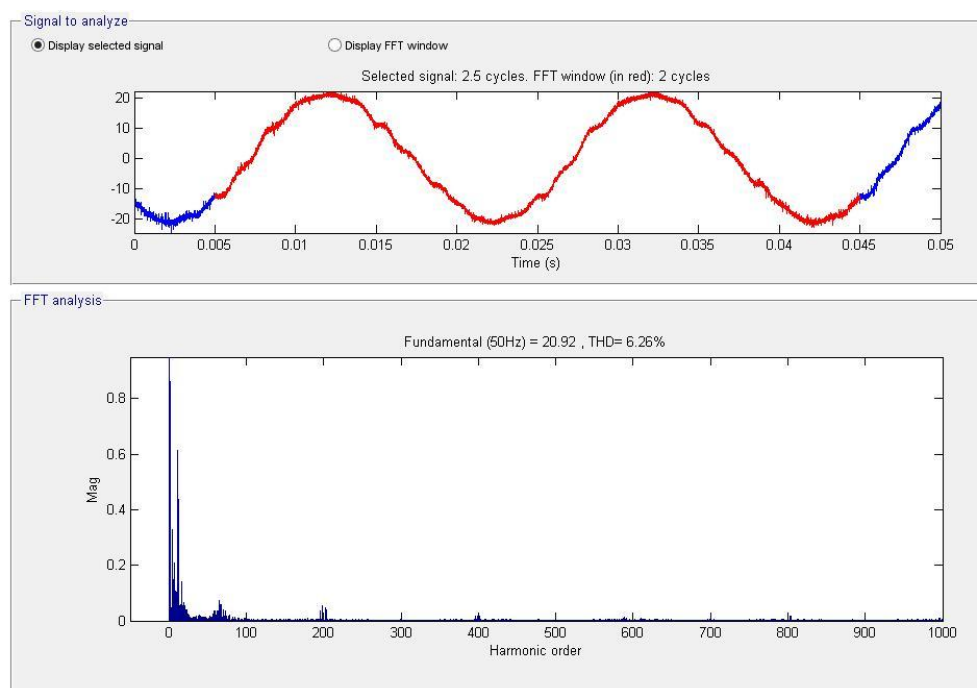


Fig. 76.- Gráfico Superior: Representación de la onda de corriente inyectada a partir de la adquisición de datos para la fase T. Gráfico Inferior: Representación del %THDi para dicha fase.

En resumen, el valor de la tasa de distorsión armónica en corriente inyectada a red, para cada una de las tres fases es:

FASE	% THDi
R	4,93 %
S	4,63 %
T	6,26 %

Tabla 12.- Tasa de Distorsión Armónica de la corriente inyectada para cada una de las tres fases.

Con el fin de determinar si los niveles obtenidos son correctos o no, es necesario compararlos con los que se establecen en las normas. En el Anexo (ii): Normativa, se exponen los artículos que regulan los diferentes aspectos de obligado cumplimiento (mediante Reales Decretos) y las recomendaciones (Normas UNE) que afectan a los convertidores eólicos como el que se estudia en el presente proyecto.

Como se puede observar, los límites de %THDi para este convertidor están por debajo del 5% excepto una de las fases, que lo supera ligeramente (atribuible a efectos exteriores ya que la medida se realizó mientras se estaban ensayando otros

convertidores en el mismo laboratorio). Es por ello que tras comparar con los valores obtenidos en la adquisición de datos, se puede afirmar que cumple con los valores regulados ($\%THDi < 5\%$).

CAPÍTULO
6.

Conclusiones y trabajo futuro.

6.1. Conclusiones.

En este trabajo se ha analizado el modelo de un inversor destinado a la minieólica y se ha diseñado una estructura de control de corriente en PSim mediante la transformada de *Clarke*, trasladando el sistema a una referencia estática $\alpha\beta$. Una vez se tiene la señal expresada en forma bifásica, se procede a su regulación, mediante el sistema PR para poder realizar el seguimiento de la señal, siendo su naturalidad una onda sinusoidal.

Una vez diseñado el circuito de potencia y comprobado su correcto funcionamiento, el siguiente paso es realizar la conversión del mismo a digital (discretización). En este caso, puesto que ya existe el montaje del convertidor de 10kW, se ha obviado la etapa de discretización y se ha pasado directamente a trabajar con el convertidor a fin de ponerlo en marcha y empezar la segunda parte del proyecto.

Si bien en la primera parte se lleva a cabo un estudio teórico y se realiza el control del lazo de corriente mediante simulaciones, en esta segunda parte del proyecto se trata de arrancar el convertidor y, una vez en funcionamiento, se aplican una serie de modificaciones a la estructura del código que controla el comportamiento del inversor.

6.2. Trabajo futuro.

A partir del trabajo que se ha hecho durante este proyecto y viendo donde ha acabado el mismo, surgen varias posibles líneas de trabajo para darle continuidad al inversor actual:

- **Dimensionado del sistema de baterías e integración para un uso doméstico.** A partir de la potencia inyectada por el convertidor, se podría realizar un hipotético estudio de dimensionado para ser instalado en una aplicación doméstica, teniendo en cuenta las posibilidades de generación de energía eólica de la zona donde se pretenda instalar.
- **Diseño de un panel interactivo para adaptar su funcionamiento a una aplicación enfocada a la docencia.** Actualmente se realiza el control del convertidor des de la tabla animada que ofrece el programa Code Composer Studio (Fig. 57). Adaptar dicha tabla con una interfaz más interactiva permitiría integrar el convertidor para la parte práctica de alguna de las asignaturas que se dan actualmente en la facultad.

Anexo (i): Presupuestos.

En este anexo se presenta el presupuesto total calculado para el Proyecto. En él se desglosan los costes del material usado, tanto a nivel de Hardware, como a nivel de Software, así como los costes del personal que ha intervenido (Ingeniero Graduado).

Presupuesto Hardware			
PRODUCTO (modelo)	PRECIO [€]/unid	Nº unidades	PRECIO TOTAL [€]
PC + Monitor + Periféricos	800,00	1	800,00
Jtag (Signum Systems JtagJet C2000)	2.100,00	1	2.100,00
DSP (Texas Instrument TMS28335 Delfino)	55,00	1	55,00
Multímetro (Demestres MY63)	15,80	2	31,60
Sonda de corriente (Chauvin Arnoux e3N)	335,00	3	1.005,00
Sonda de tensión aislada	260,00	1	260,00
Osciloscopio (Yokogawa DL 78 e)	14.220,00	1	14.220,00
Convertidor completo: Incluyendo aparamenta de maniobra, seguridad y elementos de control/potencia.	11.800,00	1	11.800,00
Fuente DC	6.300,00	1	6.300,00
Fuente AC	6.300,00	1	6.300,00
SUBTOTAL	/	/	40.716,60

Tabla 13.- Presupuesto Hardware. Valores sin I.V.A.

Presupuesto Software	
PRODUCTO	PRECIO [€]
Licencia individual Matlab estándar	2000,00
Pack Office para empresa	8,80€/mes * 7 meses = 61,60€
PSIM	350,00
Code Composer Studio	495,00
SUBTOTAL	2.906,60

Tabla 14.- Presupuesto Software. Valores sin I.V.A.

Puesto que los elementos usados para el Proyecto no se han adquirido únicamente para esta aplicación, se debe tener en cuenta el uso que se le ha hecho en función de su vida útil. Se pueden aceptar los siguientes períodos de vida útil para los elementos, según su clasificación:

APLICACIÓN	VIDA ÚTIL	
Equipos informáticos	4 años	48
Equipos electrónicos y de medida	6 años	72
Equipos eléctricos y osciloscopio	10 años	120

Tabla 15.- Vida útil material según aplicación.

Aplicando los valores de la Tabla 15, y contabilizando un desgaste equivalente de **medio año (6 meses)**, los costes equivalentes del material resultarán ser los siguientes:

Costes Equivalentes (Hardware)		
PRODUCTO (modelo)	Clasificación	PRECIO Equiv. [€]
PC + Monitor + Periféricos	Eq. Informáticos	100,00
Jtag (Signum Systems JtagJet C2000)	Eq. Electrónicos y medida	175,00
DSP (Texas Instrument TMS28335 Delfino)	Eq. Electrónicos y medida	4,58
Multímetro (Demestres MY63)	Eq. Electrónicos y medida	2,64
Sonda de corriente (Chauvin Arnoux e3N)	Eq. Electrónicos y medida	83,75
Sonda de tensión aislada	Eq. Electrónicos y medida	21,67
Osciloscopio (Yokogawa DL 78 e)	Eq. eléctricos y osciloscopio	711,00
Convertidor completo: Incluyendo apartament de maniobra, seguridad y elementos de control/potencia.	Precio invariante.	11.800,00
Fuente DC	Eq. eléctricos y osciloscopio	315,00
Fuente AC	Eq. eléctricos y osciloscopio	315,00
SUBTOTAL	/	13.528,63

Tabla 16.- Costes reales del material usado (valores equivalentes), I.V.A. no incluido.

Para llevar a cabo los experimentos realizados durante el Proyecto, se ha dispuesto de una bancada de pruebas con conexiones a red de 16, 32 y 63 A, con sus correspondientes protecciones.

El alquiler de una bancada de este tipo se estipula en un valor de 3000€/mes, para un uso laboral a jornada completa (8h/día y 5días/semana). Para el mismo período que se ha utilizado en el cálculo anterior (6 meses) y teniendo en cuenta que se ha trabajado a media jornada (4h/día y 5días/semana), se deduce que el coste equivalente de alquiler de dicho banco de pruebas es de la mitad, por lo que:

Presupuesto Alquiler Bancada Laboratorio	
CONCEPTO	Precio [€]
Alquiler Bancada laboratorio para ½ jornada y 6 meses	9.000,00

Tabla 17.- Presupuesto Alquiler Bancada de Laboratorio. Valor sin I.V.A.

A partir de la tabla del Diagrama de Gantt, se observa que los días totales dedicados al Proyecto han sido 220 (7 meses), dividido en tres etapas:

Tarea	Días
Etapa 1	60
Etapa 2	120
Etapa 3	40
TOTAL	220

Tabla 18.- Desglose de días según etapa.

De cara al coste de Recursos Humanos, se deben restar días (ya que no se ha trabajado cada día durante dicho período). Si se descuentan fines de semana, con el objetivo de contabilizar los días realmente trabajados y se estima una media de 2 horas/día, queda un total de días trabajados de:

$$220 - (7 \cdot 4 \cdot 2) = 164 \text{ días útiles} \cdot \frac{2 \text{ horas}}{\text{día útil}} = 328 \text{ horas.}$$

Por lo que, aplicando un coste de 15€/hora, según convenio, se obtiene un presupuesto de:

Presupuesto Recursos Humanos		
CONCEPTO	Precio /unid	Precio Total [€]
328 horas ingeniero	25€/h	8.200,00

Tabla 19.- Presupuesto Recursos Humanos.

Una vez desglosado todo el material y recursos que se han dedicado para el Proyecto, a continuación se muestra (Tabla 20) un resumen del coste total necesario para llevarlo a cabo:

Concepto	Importe [€]
Recursos Software	2.906,60
Recursos Hardware	13.528,63
Recursos Humanos	8.200,00
SUBTOTAL	24.635,23
21% I.V.A.	5.173,40
<u>TOTAL</u>	<u>29.808,63</u>

Tabla 20.- Presupuesto Total Proyecto.

Finalmente, se puede concluir que el presupuesto total para la realización del actual proyecto, teniendo en cuenta todos los factores que intervienen en el proceso es de **29.808,63 €.**

Anexo (ii): Normativa.

A nivel oficial del Estado, se han aprobado los siguientes Reales Decretos y Directivas:

- Real Decreto 1663/2000, de 29 de septiembre, sobre conexión de instalaciones fotovoltaicas a la red de baja tensión.
- Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica.
- Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Directiva 2004/108/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, 15 de diciembre de 2004, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros en materia de compatibilidad electromagnética.
- Directiva 2006/95/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la aproximación de las legislaciones de los Estados miembros sobre el material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.
- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables
- Directiva 2006/95/CE (Diciembre de 2006): Material eléctrico destinado a utilizarse con determinados límites de tensión.
- Directiva 2004/108/CE (Diciembre de 2004): Compatibilidad electromagnética.
- Reglamento electrotécnico para baja tensión, RD 842/2002 de Agosto de 2002 y sus Instrucciones Técnicas complementarias.

Por otro lado, hay las Normas UNE (Una Norma Española), que no son de obligado cumplimiento. Aún y así, los artículos que las componen son creados por comités técnicos de normalización. Del bloque de las UNE, son especialmente de interés para el convertidor de potencia estudiado las que pertenecen al siguiente grupo:

- UNE – EN 61000 – X: Compatibilidad Electromagnética.
- UNE – EN 61439 – X: Conjuntos de aparamenta de Baja Tensión.

Anexo (iii): Bibliografía.

- **Libros.**

- [1] MOHAN, Ned; M. UNDELAND, Tore; P. ROBINS, William.
"Power Electronics. Converters, Applications and Design". 3ª Edición. Estados Unidos de América. John Wiley & sons ed., 2003. 802p.
- [2] TEORODESCU, Remus; LISERRE, Marco; RODRÍGUEZ, Pedro.
"Grid converters for Photovoltaic and Wind Power Systems". 1ª Edición. Reino Unido. John Wiley & sons ed., 2011. 398p.
- [3] BUSO, Simone; MATTAVELLI, Pablo.
"Digital Control in Power Electronics". 1ª Edición. Estados Unidos de América. Morgan & Claypool, 2006. 151p.
- [4] ORLOWSKA-KOWALSKA, Teresa; BLAABJERG, Frede; RODRÍGUEZ, José.
"Advanced and Intelligent Control in Power Electronics and Drives". 1ª Edición. Reino Unido. Springer, 2014. 410p.

- **Artículos y publicaciones.**

- [5] C. ALEXANDRA; Ali M. ALMAKTOOF; A.K. Raji. [2013].
"Development of a Proportional + Resonant (PR) Controller for a Three-Phase AC Micro-Grid System". Society of Digital Information and Wireless Communications (SDIWC).
- [6] R. TEORODESCU; F. BLAABJERG; M. LISERRE; P.C. LOH. [September 2006].
"Proportional-Resonant Controllers and Filters for Grid-Connected Voltage-Source Converters". Electric Power Applications, IEE Proceedings. Vol. 153, Nº 5, páginas 750 – 762.
- [7] D. ZAMMIT; C. SPITERI STAINES, M. APAP. [2014].
"Comparisiion between PI and PR Current Controllers in Grid Connected PV Inverters". International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, Vol. 8, Nº 2, páginas 217 – 222.
- [8] A. VIDAL; F.D. FREIJEDO; A.G. YEPES; P. FERNÁNDEZ-COMESAÑA; J. MALVAR; O. LÓPEZ; J. DOVAL-GANDOY. [Abril de 2013]
"Assessment and Optimization of the Transient Response of Proportional-Resonant Current Controllers for Distributed Power Generation Systems". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, Nº 4, páginas 1367 – 1383.

- [9] H. KOPETZ; C. EL-SALLOUM; B. HUBER; R. OBERMAISSER. [2007]
"Periodic Finite-State Machines". Proceedings of the 10th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC '07).
- [10] A. DRIESSE; S. HARRISON; P. JAIN. [2008]
"A Finite State Machine Model to Represent Inverters in Photovoltaic System Simulations". IEEE Transactions on Industrial Electronics, páginas 2568 – 2573.
- [11] LUNA, A. [Febrero 2012].
"Power Converter for 10kW Mini-Windturbine Applications". Laboratory Report, SEER. 26p.
- [12] CHAVARRÍA, J. [Curso 2009 – 2010]
"Diseño e Implementación de un Inversor Multinivel para Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Red". TFM, ETSETB, U. Politècnica de Catalunya. 242p.
- [13] OLIVES, J. Carlos. [Diciembre 2013]
"Control convertidor DC-AC de 100kW". PFC, EET, U. Politècnica de Catalunya. 219p.
- [14] BROGERAS, B. [Octubre 2011].
"Diseño y Validación del Control Digital de un Inversor de Potencia en Ejes de Referencia Síncronos Conectado a Red". PFC, U. Carlos III de Madrid. 143p.

• **Páginas web.**

- [15] Información sobre el JTag:
<http://www.embedded.com/electronics-blogs/beginner-s-corner/4024466/Introduction-to-JTAG>
- [16] Información sobre el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE):
https://es.wikipedia.org/wiki/Institute_of_Electrical_and_Electronics_Engineers
- [17] Transformada de Clarke (abc- $\alpha\beta$).
http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Clarke_Transform
- [18] Transformada de Clarke (abc- $\alpha\beta$).
http://www.microsemi.com/document-portal/doc_view/132799-park-inverse-park-and-clarke-inverse-clarke-transformations-mss-software-implementation-user-guide
- [19] Feed-Forward Control.
[https://en.wikipedia.org/wiki/Feed_forward_\(control\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Feed_forward_(control))